



Etude d'installation des pompes solaires dans les zones rurales à caractère inondable du Niger : cas de la région d'Agadez et de la région de Tahoua

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE**

OPTION : ENERGIE RENOUVELABLE

Présenté et soutenu publiquement le 8 juillet 2019 par :

Djabre MAHAMANE SANI IBRAHIMA (2013 1013)

Les encadreurs :

Mr Y. Moussa SORO
Enseignant-chercheur à 2iE,
Département Génie Electrique, Energétique et Industriel
ET

Mr DOUDOU BOUKARY Ibrahim
Ingénieur au Département Ingénierie au
Centre National d'Energie Solaire (Niger)

Jury d'évaluation :

Président : Pr Yézouma COULIBALY

Membres et correcteurs : M. Aboubacar GOMNA

: Dr Y. Moussa SORO

Promotion [2018-2019]

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver à ce stade afin de réaliser ce travail que

je dédie :

À ma très chère mère ;

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour et l'affection dont elle ne cesse de me combler. Qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de mon profond amour et éternelle reconnaissance.

À mon très cher père ;

Pour ses encouragements, sa détermination, son courage et sa patience.

À mes frères et sœurs ;

Qu'ils trouvent ici l'expression de mon amour.

À mes chers amis

Une pensée très spéciale envers mes collègues et amis pour leur soutien.

Contact : +227 98 97 09 98 plus WhatsApp

Mail : ddjabresani3@gmail.com

Citation

«C'est justement la possibilité de réaliser un rêve qui rend la vie intéressante».

Paulo Coelho/l'Alchimiste

Remerciements

D'abord, je tiens à remercier mon monsieur Moussa Yrèbégnan SORO, et je lui exprime toute ma reconnaissance pour sa confiance en mon travail, sa patience et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués.

Ensuite, mes vifs remerciements vont également au centre national d'énergie solaire de Niamey de m'avoir accepté comme stagiaire et de me proposer un sujet très intéressant ainsi qu'à l'ensemble des personnels dudit centre pour leurs précieux conseils, leur indéfectible disponibilité et leur patience spécialement à mon encadreur monsieur Ibrahim DOUDOU BOUKARY pour ses conseils, sa disponibilité et pour m'avoir fait profiter de ses connaissances et de ses qualités tant professionnelles qu'humaines.

Nous ne pourrions passer sous silence toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué au succès de notre stage et ont été d'un apport appréciable à l'élaboration de ce travail. Nos remerciements distingués vont à l'endroit de :

- ❖ Monsieur MAAZOU SALIFOU Abdoul-Moumouni un ami très précieux ;
- ❖ Monsieur Tchiffa MAIDAGI notre père et notre doyen ;
- ❖ Monsieur Mahamane Noura MOUSSA SANI agent de la NIGELEC ;
- ❖ Monsieur Harouna Ango.

Enfin, j'adresse toute ma gratitude à mes enseignants depuis le primaire jusqu'à l'université (Fondation 2iE) sans vous je ne serai pas à ce stade et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce présent mémoire présente les résultats des études techniques et financières pour la faisabilité ou la réalisation de 43 installations de pompage solaire dans les zones rurales à caractère inondable de 2 régions du Niger à savoir la région d'Agadez et la région de Tahoua. Il s'agit d'un programme de projet de Gestions des Risque et Catastrophes et Développement Urbain (GRC-DU), le Programme de Mécanisme de Réponse Immédiat (PMRI) qui consiste à remplacer les motopompes (essence/diesel) par un système de pompage solaire. Trois cas de figure ont été étudiés : pour 1 ha, pour 0,5 ha et pour 0,25 ha et leur analyse de viabilité pour les deux régions.

De cette analyse, découla le choix sur l'investissement à effectuer, car, l'analyse des coûts et de la rentabilité est un préalable incontournable avant toute décision d'investissement sur un projet surtout sur les équipements solaires.

L'opportunité de ce travail est double : d'une part, il permet aux exploitants d'avoir leurs récoltes à temps avant la tombée de la pluie en fonction des diverses études et des propositions techniques. D'autre part, il permet d'avoir une idée précise sur les coûts d'investissement en connaissant les besoins en eau ou la superficie exploitée par l'utilisateur pour son maraîchage.

Pour les 8 sites identifiés à caractère inondable de deux régions, le coût du projet de 43 installations est estimé à cent quarante millions cinquante mille six cents francs CFA (140 050 600 francs CFA) pour seulement les sites de deux régions.

Les Mots clés

- Maraichage
- Motopompe
- Pompage solaire
- Zones à caractère inondable

Abstract.

This thesis presents the results of the technical and financial studies for the feasibility or realization of 43 solar pumping facilities in rural areas of flood-prone nature in 2 regions of Niger, namely the Agadez region and the Tahoua region. It is a project program of Risk Management and Disaster Management and Urban Development (GRC-DU), the Immediate Response Mechanism (PMRI) Program, which consists of replacing motor pumps (gasoline/diesel) by a solar pumping system. Three cases were studied: per 1 ha, per 0.5 ha and per 0.25 ha and their viability analysis for the two regions.

From this analysis, the choice on the investment to be made arises, because the analysis of costs and profitability is an unavoidable prerequisite before any investment decision on a project, especially on solar equipment.

The opportunity for this work is twofold: on the one hand, it allows farmers to have their crops in time before the rain falls, according to various studies and technical proposals. On the other hand, it makes it possible to have a precise idea of the investment costs by knowing the water needs or the area exploited by the user for his market gardening.

For the 8 identified flood-prone sites in two regions, the project cost of 43 installations is estimated at one hundred and forty million fifty thousand six hundred CFA francs (140,050,600 CFA francs) for only sites in two regions.

The Keywords

- Marshalling
- Motor pump
- Solar pumping
- Areas of Flooding Character

Liste des abréviations

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
PMRI	Programme de Mécanisme de Réponse Immédiate
CNES	Centre National d'Energie Solaire
PGRC-DU	Projet de Gestion des Risques de Catastrophes et du Développement Urbain
ONERSOL	Office National de l'Energie Solaire
EPA	Etablissement Public à caractère Administratif
HMT	Hauteur manométrique totale
P_g	Puissance du générateur [W]
P_C	Puissance crête du générateur [W_C]
G	Irradiation globale [$Wh/m^2 \times jr$]
H	Irradiation selon l'angle d'inclinaison [$Wh/m^2 \times j$]
ha	Hectare
FAO	Fonds de Nations unies pour l'Agriculture
TDR	Thème de référence

SOMMAIRE

Dédicaces	I
Citation	II
Remerciements	III
Résumé	IV
Abstract	V
Liste des abréviations	VI
Liste des Tableaux.....	3
Liste des Figures.....	4
I. Introduction	5
II. Présentation de la structure d'accueil CNES.....	7
II.1 Historique du CNES	7
II.2 Les missions du CNES	8
II.3 Organigramme du CNES	8
III. Les objectifs	9
III.1 Objectif général.....	9
III.2 Objectif spécifiques	9
IV. Présentation des données des sites inondés des régions d'Agadez et de Tahoua.....	10
IV.1 Pour la région d'Agadez	10
IV.2 Pour la région de Tahoua	10
IV.3 Présentation de la carte d'étude	11
IV.4 La classification des sites	11
V. Dimensionnement du système par la méthode analytique	13
V.1. Estimation du besoin en eau	13
V.2. Calcul de l'énergie nécessaire (hydraulique et électrique) pour la pompe	13
V.3. Détermination de l'énergie nécessaire.....	16
VI. Dimensionnement par la méthode graphique.....	18

VI.1.	Résultats	20
VII.	Choix des composants	21
VII.1.	Choix de la pompe	21
VII.2.	Choix des modules photovoltaïques	21
VII.3.	Calcul des conduites	23
VII.4.	Vérification des paramètres calculés.....	24
VII.5.	Vérification de paramètre choisi	24
VII.6.	Installation du système.....	25
VIII.	Devis quantitatif et financier	28
VIII.1.	Devis total du matériel	28
VIII.2.	Devis financier par exploitant	29
VIII.3.	Plan d'exécution du projet.....	30
IX.	Analyse économique	31
IX.1.	Etude économique pour 1 ha.....	31
IX.1.1.	Coût d'investissement.....	31
IX.1.2.	Dépenses d'exploitation	32
IX.1.3.	Estimation des recettes	32
IX.1.4.	Rentabilité financière du projet	32
IX.1.5.	Calcul de la valeur actuelle nette (VAN).....	32
IX.1.6.	Calcul de la valeur actuelle nette de gain	Erreur ! Signet non défini.
IX.2.	Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 1 ha	33
IX.3.	Calcul de la rentabilité du projet avec 95% de dette du coût du projet pour un hectare	34
IX.4.	Etude économique pour 0,5 ha.....	35
IX.4.1.	Coût d'investissement.....	35
IX.4.2.	Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 0,5 ha	36
IX.4.3.	Calcul de la rentabilité du projet avec 95% de dette du coût du projet pour 0,5 ha	36

IX.5.	Etude économique pour 0,25 ha.....	37
IX.5.1.	Coût d'investissement.....	37
IX.5.2.	Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 0,25 ha.....	38
IX.5.3.	Calcul de la rentabilité du projet avec 95% de dette du coût du projet pour 0,25 ha	38
IX.6.	Synthèse de l'analyse économique	39
X.	Conclusion et recommandations	41
XI.	Bibliographie.....	42
	Liste des annexes.....	44
XII.	Les Annexes	45

Liste des Tableaux

Tableau I :	Les données de la région d'Agadez	11
Tableau II :	Les données de la région de Tahoua.....	12
Tableau III :	Catégorisation des données	12
Tableau IV :	Tableau des besoins en eau	13
Tableau V :	Récapitulatif de la HMT	14
Tableau VI :	Calcul de l'énergie et puissance hydraulique et électrique	15
Tableau VII :	La moyenne d'Irradiation par mois	16
Tableau VIII :	Calcul d'énergie journalière.....	17
Tableau IX :	Puissance du générateur	18
Tableau X :	Synthèse de deux résultats pour le dimensionnement	20
Tableau XI :	Caractéristiques des pompes choisies	21
Tableau XII :	Caractéristiques des modules choisis.....	22
Tableau XIII :	Section des câbles entre le coffret électrique et la pompe.....	23
Tableau XIV :	Section des câbles du générateur PV au coffret électrique	23
Tableau XV :	Calcul des conduites	24
Tableau XVI :	Vérification des paramètres.....	24
Tableau XVII :	La moyenne d'insolation journalière.....	25
Tableau XVIII :	Devis total du matériel.....	28
Tableau XIX :	Exemple de calcul du devis financier par exploitant.....	29

Tableau XX : Devis financier par exploitant	29
Tableau XXI : Plan d'exécution	30
Tableau XXII : Rentabilité du projet pour 1ha avec 95% de dette	34
Tableau XXIII : La rentabilité du projet avec 95% de dette sur le coût du projet pour 0,5 ha	36

Liste des Figures

Figure 1: Exemple de matériels utilisés par les exploitants et leur maintenance	6
Figure 2 : Organigramme du CNES	8
Figure 3: La carte de la zone d'étude.....	11
Figure 4 : Installation de la HMT	14
Figure 5 : Diagramme 1 pour déterminer la taille du générateur photovoltaïque nécessaire pour couvrir une demande d'énergie hydraulique [4]	19
<i>Figure 6 : Courbe de la moyenne d'insolation journalière</i> Le sens.....	20
Figure 7 : Diagramme 2 pour déterminer le débit crête de la pompe et la puissance crête du générateur PV [4]	20
Figure 8 : Courbe de la moyenne d'insolation journalière	25
Figure 9 :Schéma de principe de fonctionnement de l'installation.....	27
Figure 10 : Schéma synoptique de l'installation adoptée [6]	27
Figure 11 : La rentabilité du projet sans la dette pour un hectare	34
Figure 12 : La rentabilité du projet sans la dette pour 0,5 ha	36
Figure 13 : Rentabilité du projet sans la dette pour 0,25 ha.....	38
Figure 14 : La rentabilité sur 5 ans pour 0,25 ha.....	39
Figure 15 : Synthèse de données financière	40

I. Introduction

L'année 2017 a été marquée par de violentes précipitations, cela a causé beaucoup des dégâts matériels et humains aux cultivateurs (agriculteurs). Le gouvernement nigérien, soucieux de leur problème a mis en place un Programme de Mécanisme de Réponse Immédiate (PMRI) à travers son Projet de Gestion des Risques de Catastrophes et du Développement urbain (PGRC-DU).

En effet, ce programme a quatre objectifs qui sont : augmenter la production alimentaire en mettant l'accent sur l'irrigation ou à travers la culture maraîchère, valoriser les ressources en eaux par l'utilisation de la nappe, la création ou consolidation des emplois ainsi que la promotion ou l'utilisation de l'énergie verte surtout le Niger est ensoleillé entre 5 à 7 kWh/m²×jr (Hadiza, et al., 2016), donc le choix de faire un pompage solaire est une solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent.

Sur les 8 sites visités de deux régions où le réseau électrique est absent, les moyens d'exhaure utilisés sont des motopompes diesel/essence. Elles consomment 4 à 5 litres de carburant pour une durée de pompage de 6 heures. Si la disponibilité du carburant ne fait pas défaut, ces machines sont utilisées au-delà de cette durée. Leur maintenance est assurée par une main-d'œuvre locale prête à toutes les interventions. Ces motopompes sont utilisées aux dires des exploitants ont une durée de vie très faible (2 à 3 ans) et nécessitent beaucoup d'entretien. Donc, un tel environnement se prête particulièrement bien à l'implantation des systèmes de pompage solaire dont le choix permet de s'affranchir d'une part, des contraintes financières liées aux achats de combustible et recours fréquents à la maintenance des équipements, et d'autre part, de renouvellement de certaines pièces mécaniques.

Il s'agit pour nous de mettre en valeur ces sites non exploités pendant la saison pluvieuse, de les catégoriser par ordre des besoins, d'étudier leurs installations de pompes et de proposer un système viable, rapide et efficace à utiliser. Le projet est prévu sur toute l'étendue du territoire national, mais par manque des données, l'étude restera sur les deux régions du Niger à savoir la région d'Agadez et la région de Tahoua. La présente étude vise à apporter des solutions de pompes solaires pour les zones considérées comme pôles de croissance maraîchère et classées comme zones à caractère inondable.

A cet effet, deux méthodes de dimensionnement de système photovoltaïque seront utilisées, une méthode analytique et une méthode graphique.



Figure 1: Exemple de matériels utilisés par les exploitants et leur maintenance

II. Présentation de la structure d'accueil CNES

II.1 Historique du CNES

Le Centre National d'Énergie Solaire (CNES) a été créé en mai 1965 et portait à l'origine l'appellation de « Office National de l'Énergie Solaire », sous l'acronyme « ONERSOL » et sous le statut d'Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC). Ce statut conférait à la structure les missions de mener à la fois des activités de :

- ✓ Recherche/Développement de systèmes dont le fonctionnement dérive de l'énergie solaire ;
- ✓ Et d'expérimentation, fabrication et commercialisation des prototypes retenus pour leur fonctionnalité.

L'entité connaîtra, avec la création d'une usine de production d'équipements solaires, particulièrement celle du chauffe-eau solaire, de retentissants succès tant au plan national que sous régional. Ainsi, de la date de création de l'usine en 1976 et 1989, l'ONERSOL a produit et commercialisé :

- ✓ 570 chauffe-eau de 200 litres/jour ;
- ✓ 100 filtres (réservoirs en aluminium) pour le Ministère de la Santé Publique (M.S.P) ;
- ✓ 100 bacs – glaciaires en aluminium pour le M.S.P;
- ✓ 1 572 mètres carrés de capteurs plans thermiques.

Dans le domaine de la Recherche/Développement, l'Office peut se targuer d'avoir conçu et mis au point des technologies qui anticipaient déjà sur l'avenir de l'énergie solaire en Afrique voire même dans le monde. Il s'agit notamment des technologies de capteurs plans à multiples vitrages, des concentrateurs solaires devant constituer les sources chaudes des moteurs thermiques.

En 1982, une restructuration de l'Office s'est imposée à cause de la faillite de la Section Fabrication et Commercialisation. Il est ainsi décidé de transformer la Section Recherche en un établissement public à caractère administratif (EPA) sous l'appellation de « Centre National de Recherche en Énergies Nouvelles et Renouvelables (CNREN) » et la Section Fabrication et Commercialisation en une société d'économie mixte, la « Société Nigérienne d'Énergies Nouvelles (SONIEN) ».

Malheureusement les textes préparés à cet effet n'ont pas été adoptés par les autorités compétentes et la restructuration en question n'a pas été effective, même avec la disparition de

la Section Fabrication. En effet, celle-ci est liquidée en 1985 avec le licenciement de son personnel.

C'est dans cette situation de réforme engagée et inachevée et de conjoncture économique peu favorable que l'ONERSOL a continué à fonctionner tant bien que mal jusqu'en 1997, année au cours de laquelle sa restructuration fut à nouveau engagée avec l'adoption de la loi n° 97-024 du 08 Juillet qui crée en lieu et place de l'ONERSOL, le Centre National d'Energie Solaire (CNES), sous le statut d'Etablissement Public à caractère Administratif placé sous la tutelle du Ministère en charge de l'Energie, alors que l'ONERSOL était sous la tutelle du Ministère chargé de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

II.2 Les missions du CNES

Suite au changement de statut, la nouvelle structure s'est vue attribuer les missions de :

- ✓ Mener des travaux de recherche sur l'utilisation des Energies Renouvelables, notamment l'énergie solaire, et d'assurer la vulgarisation des résultats ;
- ✓ Participer à la réalisation d'études prospectives et diagnostiques en matière d'utilisation des Energies Renouvelables pour tous les secteurs de l'économie nationale ;
- ✓ Participer à la formation en matière d'Energies Renouvelables.

II.3 Organigramme du CNES

Le Centre est administré par un Conseil d'Administration dont les membres sont nommés pour un mandat de trois (3) ans renouvelable par arrêté du Ministre chargé de l'Energie.

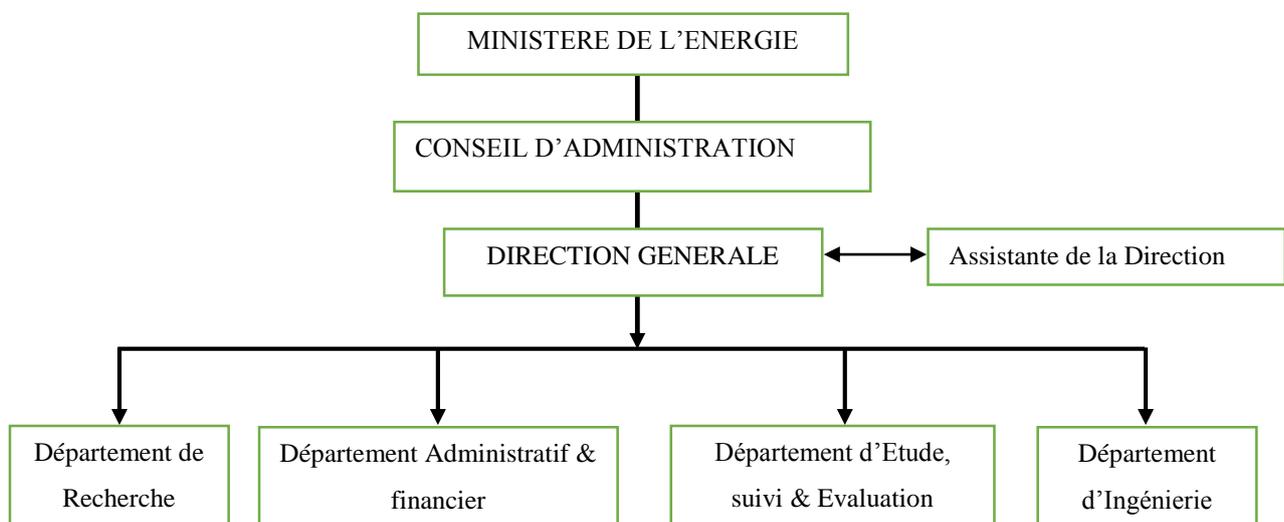


Figure 2 : Organigramme du CNES

III. Les objectifs

III.1 Objectif général

L'objectif général de ce mémoire est d'établir une étude technico-financière pour la réalisation de pompage solaire (ou pompage au fil du soleil) dans les zones rurales à caractère inondable du Niger de deux régions de la conception à la réalisation.

III.2 Objectif spécifiques

Il s'agit spécifiquement pour ces zones de :

- ✓ Identifier les sites dont leur nappe est comprise entre 0 à 15 m et apprécier les activités qui y sont développées ;
- ✓ Évaluer et/ou projeter les besoins réels en eau de chaque site afin de faire le dimensionnement de la technologie solaire à implanter ;
- ✓ Démontrer la rentabilité d'un système de pompage solaire ;
- ✓ Enfin, proposer des solutions adéquates pour l'exploitation du système.

IV. Présentation des données des sites inondés des régions d'Agadez et de Tahoua

Une enquête (mission) effectuée par l'équipe du projet de gestion des risques et catastrophes et du développement urbain et du CNES a fourni les données pour les deux régions du Niger ; la région d'Agadez et la région de Tahoua.

IV.1 Pour la région d'Agadez

Cinq sites inondables ont été identifiés à savoir :

- Les sites de la Vallée d'Emassakmane ;
- Les sites de la Vallée de Kelfodete ;
- Les sites de la Vallée d'Azal ;
- Les sites de la Vallée de Tanout n'ghaidam ;
- Les sites de la Vallée Tagazer.

Les données des sites sont présentées dans un tableau à l'annexe I : les données de la région d'Agadez.

IV.2 Pour la région de Tahoua

Trois sites inondables ont été identifiés pour ce projet à savoir :

- Le site de Tchiara 1-2 ;
- Le site de Bagaroua ;
- Le site de Tadiss.

Les données sont présentées dans un tableau à l'annexe II : Les données de la région de Tahoua.

Tous les sites présents dans les deux tableaux répondent aux critères de thème de référence (TDR) du projet défini par l'État qui sont :

- Le site doit être inondable ;
- Le niveau de la nappe doit être compris entre 0 à 15 m ;
- Le site doit abriter la culture maraichère et
- Il doit être éloigné du réseau de la Nigelec.

IV.3 Présentation de la carte d'étude

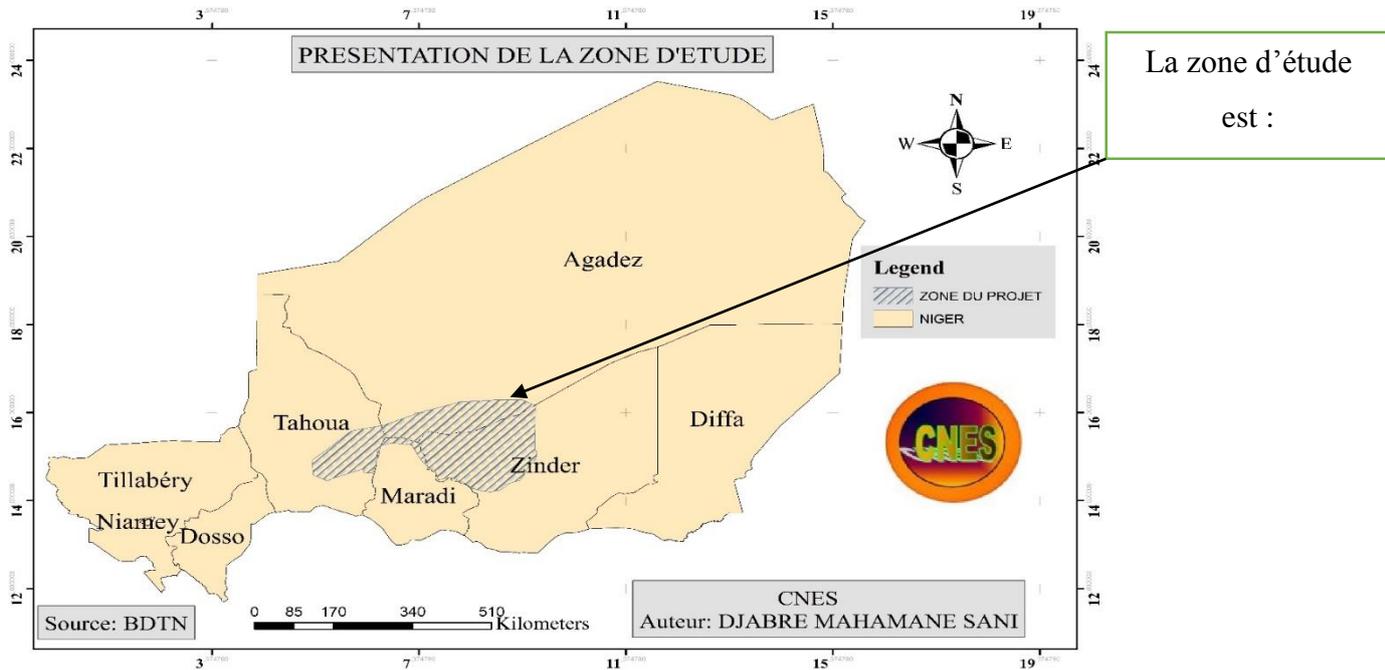


Figure 3: La carte de la zone d'étude

IV.4 La classification des sites

Conformément aux termes de référence (TDR) du projet, tous les sites présents dans les deux tableaux ci-présents ont une profondeur inférieure ou égale à 15 mètres.

Tableau I : Les données de la région d'Agadez

N°	Superficie (ha)	Nombre	Profondeur maximale de la pompe (m)	Niveau statique mesuré(m)	Niveau dynamique (m)	Rabattement (m)
1	0,25	2	12	7,5	12	4,5
2	0,5	9	14	8	14	6
3	1	1	14,5	9	14,5	5,5
4	2	1	14	9	14	5
5	2,5	1	15	10	15	5
6	3,5	1	14,5	9	14,5	5,5
7	4	1	14	8	14	6

Les niveaux de rabattement d'après les essais sont acceptables 4,5 à 6 m ; qui est la différence de niveau de profondeur d'eau après le pompage.

Tableau II : Les données de la région de Tahoua

N°	Superficie (ha)	Nombre	Profondeur maximale de la pompe (m)	Niveau statique mesuré(m)	Niveau dynamique (m)	Rabattement
1	0,25	1	8	4	8	4
2	0,5	5	12	5	12	7
3	1	6	10,5	5	10,5	5,5
4	1,5	3	10	4	10	6

Les sites dont les données sont présentées dans les deux tableaux I et II répondent aux conditions des TDR du projet. Dans une région donnée, la nappe phréatique n'a pas la même profondeur pour tous les sites. Aussi, pour chaque catégorie de sites nous avons considéré la profondeur maximale (donnée dans les tableaux I et II) pour le dimensionnement. Les TDR nous recommande de ne dimensionner les installations de pompage (forage et systèmes PV que pour les superficies 0,25 hectare maximum. En d'autres termes, si la superficie est supérieure à 0,25 hectare il faut la scinder en plusieurs parcelles et proposer une installation pour chacune d'elles. Ainsi, Après la catégorisation des sites, nous avons des superficies comprises entre 0,25 à 4 hectare (ha). En suivant la proposition du TDR nous obtenons pour l'ensemble des sites 231 parcelles de 0,25 ha et donc autant de systèmes individuel de pompage à construire. Cette proposition sera très coûteuse pour les clients qui sont les agriculteurs. Afin de réduire ce nombre de systèmes nous avons mené une réflexion basée sur des essais de pompage dans la région de Tahoua (Voir annexe II). Il en ressort qu'un forage peut fournir au minimum 60 m³/ha-jour. Par ailleurs, selon la FAO (FAO, 2015) il faut 50 m³/jour pour l'irrigation d'un hectare de légume. Nous avons cette valeur comme base pour le morcellement des périmètres à irriguer : la superficie d'une parcelle pour est un forage est fixé à 1 ha au lieu de 0,25 ha. Les exploitants dont la superficie est supérieure à 1 ha auront un système sur chaque parcelle. Nous avons désormais 43 systèmes à construire comme présenté dans le tableau III. Le temps de pompage est de 6 heures par jour.

Tableau III : Catégorisation des données

N°	Superficie (ha)	Nombre	Profondeur maximale de la pompe (m)	Niveau statique mesuré(m)	Niveau dynamique (m)	Rabattement
Pour la région d'Agadez						
1	0,25	2	12	7,5	12	4,5
2	0,5	11	14	8	14	6
3	1	12	15	10	15	5
Pour la région de Tahoua						
1	0,25	1	8	4	8	4
2	0,5	8	12	5	12	7
3	1	9	10,5	5	10,5	5,5

D'après, le tableau III, nous aurons 6 systèmes de pompage à dimensionner.

V. Dimensionnement du système par la méthode analytique

Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage solaire sont :

- Estimation du besoin en eau ;
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire ;
- Détermination de l'énergie électrique nécessaire et
- Les choix des composants.

V.1. Estimation du besoin en eau

Tous les sites visités présentent les mêmes caractéristiques en termes de diversité de cultures pratiquées sur un même périmètre. Nous avons abordé la question de l'estimation des besoins en eau des périmètres en nous appuyant sur les normes standards du fonds de nations unies pour l'agriculture (FAO) et sur les résultats des essais de pompage fournis par le Génie Rural. Selon les données de la FAO, les besoins en eau sont de 50 m³/ha/jr pour les cultures de légumes et 43 m³/ha/jr pour les céréales (FAO, 2015). Nous avons retenu à l'hectare un besoin journalier de 50 m³. Un réservoir sera utilisé selon le besoin de chaque exploitant.

Tableau IV : Tableau des besoins en eau

N°	Superficie (ha)	Nombre	Besoin en eau(m ³)	Réservoir (m ³)
Pour la région d'Agadez				
1	0,25	2	12,5	3
2	0,5	11	25	5
3	1	12	50	10
Pour la région de Tahoua				
1	0,25	1	12,5	3
2	0,5	8	25	5
3	1	9	50	10

L'eau pompée sera utilisée directement par les exploitants pour diminuer la charge de stockage, seulement ¼ du besoin sera dans le réservoir pour une utilisation pendant le pique.

V.2. Calcul de l'énergie nécessaire (hydraulique et électrique) pour la pompe

- Détermination de la HMT

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la somme du niveau dynamique (le rabattement plus le niveau statique), de la hauteur du réservoir et de la somme des pertes de charge. La perte totale de charge maximale est considérée égale à 10% de la hauteur manométrique totale à cause de la petite longueur de la conduite.

$$HMT = (Nd + Hr)(1 + Pc)$$

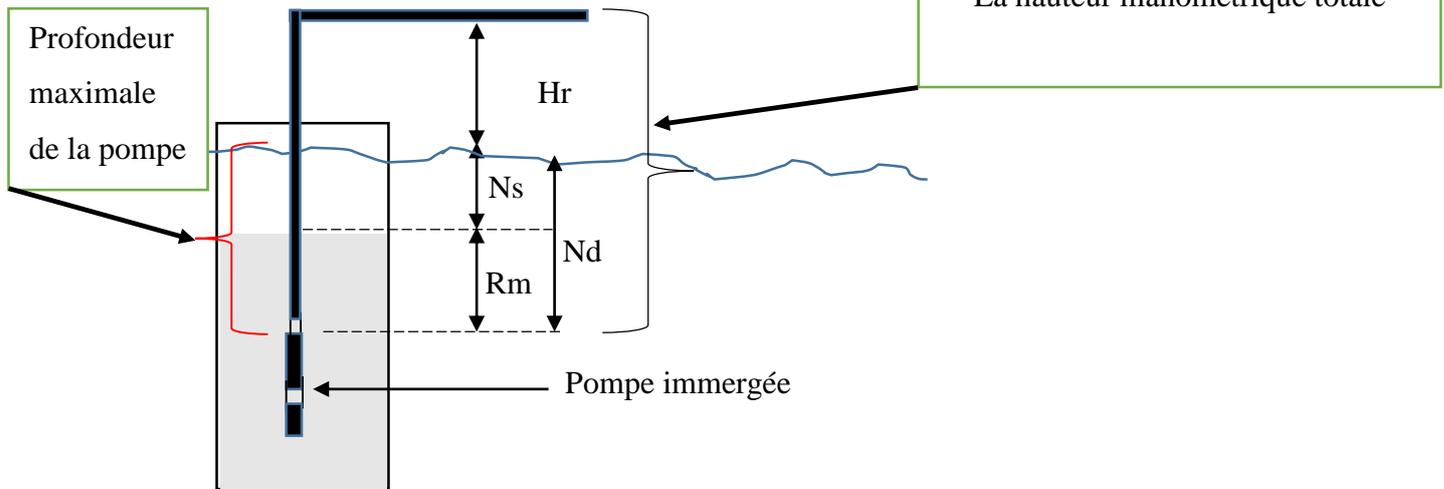


Figure 4 : Installation de la HMT

- Nd Niveau dynamique (m)
- Rm Rabattement (m)
- Ns Niveau statique mesuré (m)
- Hr Hauteur du réservoir (m)
- Pc Pertes dans les tuyauteries (10%)

Tableau V : Récapitulatif de la HMT

N°	Superficie (ha)	Niveau statique mesuré(m)	Rabattement (m)	Niveau dynamique (m)	Hauteur du réservoir (m)	Pertes dans les tuyauteries (10%)	HMT (m)
Pour la région d'Agadez							
1	0,25	7,5	4,5	12	3	10	17
2	0,5	8	6	14	3	10	19
3	1	10	5	15	3,5	10	20
Pour la région de Tahoua							
1	0,25	4	4	8	3	10	12
2	0,5	5	7	12	3	10	17
3	1	5	6,5	11,5	3,5	10	17

Selon les données obtenues et le besoin en eau, la HMT a été calculée selon les caractéristiques de chaque région. La pompe sera utilisée dans la limite de la hauteur recommandée et c'est une pompe immergée, les tuyaux auront un diamètre suffisant pour minimiser les pertes des charges.

- Calcul d'énergie et puissance hydraulique et électrique du moteur

Les calculs sont effectués pour un système de pompage au fil du soleil. Nous optons pour une pompe centrifuge équipée d'un moteur à courant continu. Le rendement du moteur est $\eta_F=0,80$ et celui de la pompe centrifuge est $\eta_5=0,5$ en fonctionnement optimal.

$$E_h = g \times \rho_a \times V_a \times \frac{HMT}{3600} \quad (1)$$

E_h	: Energie hydraulique	Wh/jour
g	: Accélération de la pesanteur	9,81 m/s ²
ρ_a	: Densité de l'eau	1000 kg/m ³
V_a	: Volume d'eau	m ³ /jour
HMT	: Hauteur manométrique totale	m
P_h	: La puissance hydraulique	W
h	: Les heures de pompage	h
P_{elec}	: Puissance électrique	W
η_E	: Rendement du moteur contrôleur DC	[0,8 à 0,92] 0,8
η_5	: Rendement de la pompe	[0,47 à 0,62] 0,5
η_{global}	: Rendement global $\eta_{global} = \eta_E * \eta_5$	$=0,5 \times 0,8$ 0,4

Le Temps moyen de pompage est de 6 heures. Ainsi nous pouvons calculer la puissance hydraulique.

$$P_h = \frac{E_h}{h} \quad (2)$$

La puissance électrique du moteur

$$P_{elec} = P_h / \eta_{global} = P_h / \eta_E * \eta_5 \quad (3)$$

Tableau VI : Calcul de l'énergie et puissance hydraulique et électrique

N°	Superficie (ha)	Besoin en eau(m ³)	HMT (m)	Energie hydraulique (Wh/jour)	Puissance hydraulique (W)	Puissance électrique (W)
Pour la région d'Agadez						
1	0,25	12,5	17	579	97	241
2	0,5	25	19	1294	216	539
3	1	50	20	2725	454	1135

Pour la région de Tahoua						
1	0,25	12,5	12	409	68	170
2	0,5	25	17	1158	193	483
3	1	50	17	2316	386	965

La formule globale est :

$$P_{elec}[W] = \frac{2,725 \times V_a(m^3) \times HMT}{\eta_{global}} \quad (4)$$

V.3. Détermination de l'énergie nécessaire

➤ Inclinaison

La culture maraichère est pratiquée généralement entre Octobre et Avril. Après une simulation sur le logiciel RESTScreen4 pour un de site de Tahoua, nous obtenons l'angle optimal pour le module pendant le période de la culture.

- Hh : irradiation sur un plan horizontal [Wh/m²×j] ;
- H : irradiation selon l'angle d'inclinaison [Wh/m²×j] ;
- L'angle optimal d'inclinaison : 25° pour cette période de la culture.

Tableau VII : La moyenne d'Irradiation par mois

Mois	Angle d'inclinaison en degré								Température moyenne °C
	Hh	H (10°)	H (15°)	H (20°)	H (25°)	H (30°)	H (35°)	H (40°)	
Janvier	5,55	6,15	6,3	6,60	6,76	6,89	6,97	7,01	23,3
Février	6,49	6,97	7,15	7,29	7,38	7,42	7,42	7,38	25,7
Mars	7,02	7,24	7,29	7,29	7,25	7,17	7,04	6,87	30,1
Avril	7,34	7,28	7,18	7,05	6,87	6,65	6,39	6,10	33,9
Mai	7,22	6,95	6,76	6,53	6,26	5,96	5,62	5,28	34,4
Juin	7,08	6,73	6,5	6,23	5,93	5,59	5,25	4,89	32,4
Juillet	6,62	6,35	6,16	5,93	5,68	5,39	5,08	4,77	29,9
Août	6,24	6,12	6,01	5,87	5,70	5,49	5,26	5,00	28,7
Septembre	6,37	6,46	6,44	6,39	6,31	6,19	6,03	5,85	30,0
Octobre	6,34	6,70	6,83	6,91	6,95	6,95	6,90	6,82	30,9
Novembre	5,98	6,59	6,84	7,05	7,21	7,33	7,40	7,42	27,8
Décembre	5,29	5,91	6,17	6,39	6,58	6,72	6,82	6,88	24,1
Σ Oct-Avril	44,01	46,85	47,85	48,57	48,99	49,12	48,95	48,48	28,0

Une inclinaison du support des modules de 25° sera utilisée (et non à une valeur proche de la latitude des sites) pour optimiser la réception du rayonnement incident sur le dispositif solaire pendant la période de culture.

➤ Calcul de la puissance du générateur photovoltaïque

❖ Calcul de l'énergie journalière

L'énergie journalière d'un moteur est le produit de la puissance électrique du moteur avec le temps d'utilisation. Elle est aussi égale à l'énergie hydraulique par le rendement global.

$$E_{jr} = P_{elec} \times T \quad (5)$$

$$E_{jr} = \frac{E_h}{\eta_{global}} \quad (6)$$

Tableau VIII : Calcul d'énergie journalière

N°	Superficie (ha)	Puissance électrique (W)	Energie journalière (Wh)
Pour la région d'Agadez			
1	0,25	241	1448
2	0,5	539	3236
3	1	1135	6813
Pour la région de Tahoua			
1	0,25	170	1022
2	0,5	483	2895
3	1	965	5791

Le Tableau VIII présente les résultats du calcul de l'énergie journalière de la pompe avec un temps de pompage de 6 heures. On constate une légère différence de l'énergie pour une même superficie entre les deux régions. Cela est dû à la variation de la hauteur manométrique totale.

❖ Calcul de la puissance du générateur

La puissance crête du générateur photovoltaïque est :

$$P_c = \frac{E_{elec}}{f \times G} \quad (7)$$

P_c : Puissance crête du générateur Wc

f : Facteur correctif global variant entre 0,65 et 0,9 (Jimmy, 0,8 et al., 1998)

G : Irradiation globale sur un plan incliné 25° 6,58 Wh/m²×j

Tableau IX : Puissance du générateur

N°	Superficie (ha)	Energie journalière (Wh)	Puissance crête Pc (Wc)
Pour la région d'Agadez			
1	0,25	1448	275
2	0,5	3236	615
3	1	6813	1294
Pour la région de Tahoua			
1	0,25	1022	194
2	0,5	2895	550
3	1	5791	1100

La puissance crête du générateur PV est déterminé en connaissant l'irradiation et l'énergie journalière de la pompe. Cette puissance nous permettra de déterminer les nombres des modules à installer.

VI. Dimensionnement par la méthode graphique

Cette méthode consiste à déterminer l'énergie électrique, la puissance crête et le débit crête connaissant l'énergie hydraulique, le rendement global et l'irradiation ; Cette méthode qui est basée sur les diagrammes des figures 5 et 6 a été proposée par A. Hadj Arab et son collaborateur (Hadj Arab, 2005). Les données de bases sont : $T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $F_m = 0,9$ et $\gamma = 0,005/^\circ\text{C}$ Où :

- ✓ T_c est la température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement ;
- ✓ F_m est le Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum et
- ✓ γ le coefficient de température des cellules. γ prend la valeur entre 0,004 et 0,005 / $^\circ\text{C}$ pour des modules au silicium mono et poly cristallin.

Dans ce paragraphe nous exposons la lecture des deux diagrammes pour faire le dimensionnement. Pour diagramme 1 (figure 5) le point de départ est l'axe OB, où on choisit la valeur correspondante à l'énergie hydraulique requise (en kWh/jour). Si nous traçons une ligne horizontale passant par cette valeur, on marque son intersection avec la courbe qui correspond au rendement du sous-système moteur-pompe $\eta_{global} = \eta_E * \eta_5 = 0,5 \times 0,8 = 40\%$. La projection de ce point d'intersection sur l'axe OC, nous donne la valeur correspondante de l'énergie électrique requise. La droite verticale passant par cette dernière valeur intercepte la courbe des puissances crêtes en fonction de l'énergie électrique pour un ensoleillement donné.

La projection de ce nouveau point d'intersection sur l'axe des puissances crête (axe OA) permet de déterminer la puissance crête du générateur PV à installer. En utilisant aussi le second diagramme donné à la figure 6 en partant de la puissance crête du générateur PV, nous pouvons déterminer graphiquement le débit de la pompe (l/s) à partir de la puissance du générateur diagramme 2 (Hadj Arab, 2005).

Les flèches en noir sur les figures 5 et 6 donnent les exemples de lecture des diagrammes pour les installations d'Agadez de 0,25 et 0,5 ha respectivement.

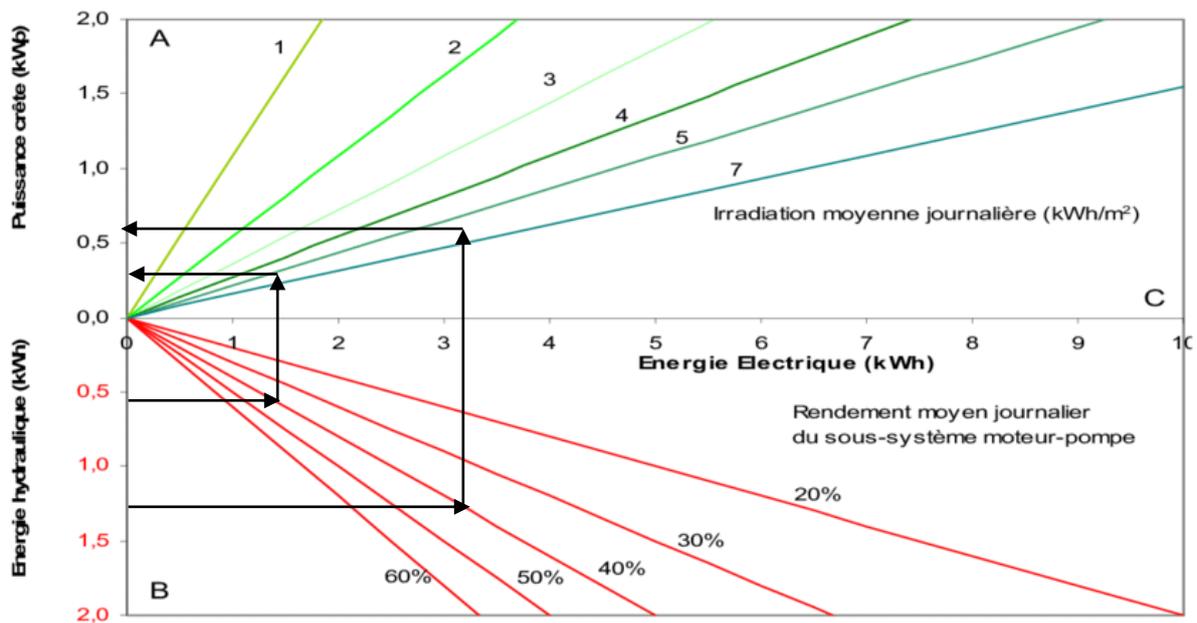


Figure 5 : Diagramme 1 pour déterminer la taille du générateur photovoltaïque nécessaire pour couvrir une demande d'énergie hydraulique (Hadj Arab, 2005)

Connaissant la puissance hydraulique crête on peut déterminer le débit crête de la pompe et la puissance crête du générateur PV dans le diagramme 2.

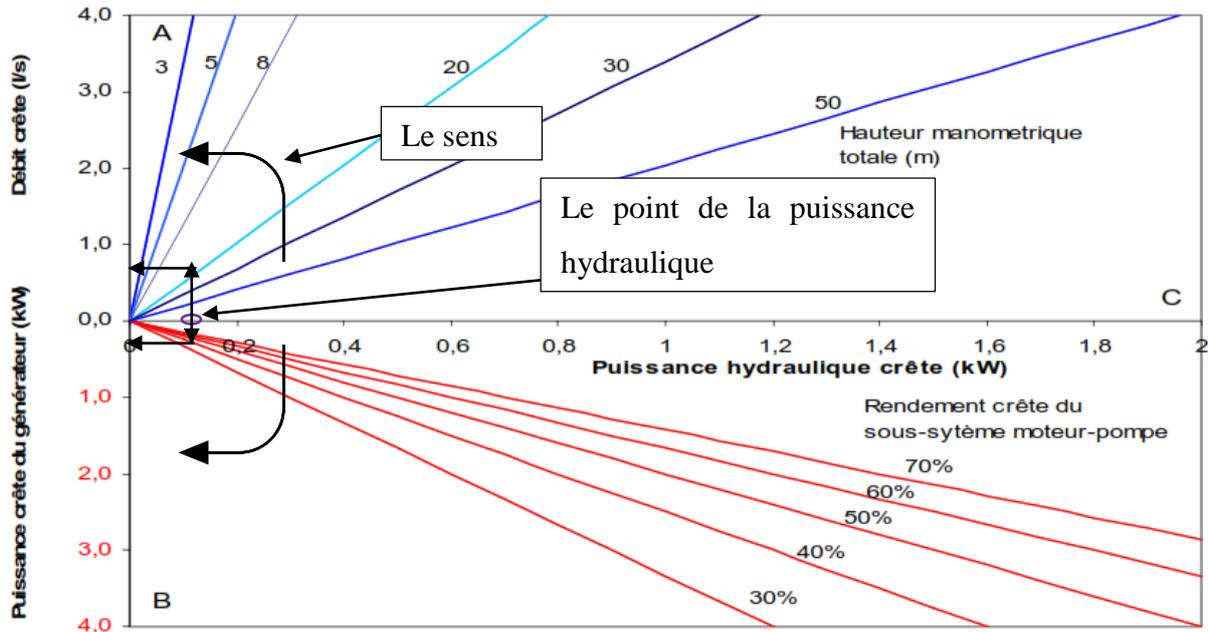


Figure 7 : Diagramme 2 pour déterminer le débit crête de la pompe et la puissance crête du générateur PV (Hadj Arab, 2005)

VI.1. Résultats

Tableau X : Synthèse de deux résultats pour le dimensionnement

N°	Superficie (ha)	Méthode analytique			Méthode graphique		
		Puissance crête du générateur W	Puissance électrique (W)	débit (l/s)	Puissance crête du générateur W	Puissance électrique (W)	débit (l/s)
Pour la région d'Agadez							
1	0,25	275	241	0,6	275	216	0,6
2	0,5	615	539	1,16	600	558	1,2
3	1	1294	1135	2,31	1240	1158	2,25
Pour la région de Tahoua							
1	0,25	194	170	0,6	200	175	0,6
2	0,5	550	483	1,16	500	483	1,2
3	1	1100	965	2,31	1085	966	2,25

D'après le tableau ci-dessus, les résultats obtenus de la puissance crête du générateur, de la puissance électrique du moteur et du débit à travers la méthode analytique sont identiques à ceux obtenus à travers la méthode graphique. Dans l'ensemble, on constate que pour une même superficie, la puissance crête du générateur et la puissance électrique du moteur sont légèrement différentes. Cela est dû à la variation de la hauteur manométrique HMT qui diffère d'une région à une autre.

VII. Choix des composants

VII.1. Choix de la pompe

Il existe des pompes solaires à courant continu appelées pompes au fil du soleil. On peut les utiliser directement sans les batteries. Pour notre projet les pompes seront choisies dans le catalogue des Pompes Solaires Lorentz immergées ou dans le catalogue de Grundfos. Une installation simple, pas de maintenance, haute fiabilité et longue durée de vie. Le système est équipé des signalisations des états de fonctionnement. Le montage doit être fait en surface et pas d'électronique immergé.

Tableau XI : Caractéristiques des pompes choisies

N°	Superficie (ha)	Puissance crête demandée (Wc)	Débit (m3/h)	HMT (m)	Les pompes choisies					
					Modèle	N° Article	A HMT (m)	Débit obtenu (m3/h)	Puissance du générateur (Wc)	Tension du circuit ouvert (V)
Pour la région d'Agadez										
1	0,25	275	2,1	17	PS 150 C-SJ5-8	2100	17	2,2	[65 – 450]	50
2	0,5	615	4,2	19	PS 1200 C-SJ8-5	1223	19	4,2	[350 – 1200]	200
3	1	1294	8,3	20	SQFlex 7-4	98978808	20	8,3	[660 – 1800]	300
Pour la région de Tahoua										
1	0,25	194	2,1	12	PS 200 HR-14	1008-X	12	2,1	[80 – 300]	100
2	0,5	550	4,2	17	PS 600 C-SJ5-8	1292	17	4,2	[300 – 900]	150
3	1	1100	8,3	17	SQFlex 7-4	98978808	17	8,8	[660 – 1800]	300

Le tableau XI présente des caractéristiques des pompes choisies dans le catalogue Lorentz et Grundfos, leur installation ne nécessite aucun outil spécifique, uniquement le système de raccordement des panneaux solaires et un coffret. Pour plus d'information veuillez voir le catalogue des pompes Annexe III : Pompe solaire Lorentz immergée Unité de pompage à centrifuge ou (GmbH, 2018).

VII.2. Choix des modules photovoltaïques

Les puissances du générateurs calculées ou déterminée sur les diagrammes sont les valeurs minimales qui permettent de satisfaire les besoins en eau du site. Les puissances qui seront réellement installées sont obtenues après la configuration du champ PV conformément aux

caractéristiques électriques de la motopompe. Les modules comme les pompes ont été choisis dans le catalogue Lorentz ainsi nous avons :

Tableau XII : Caractéristiques des modules choisis

N°	Superficie (ha)	Puissance crête demandée (Wc)	Puissance du générateur (Wc)	Tension nominale (V)	Les modules choisis						
					Type	Série	Puissance Wc	Puissance totale installée Wc	Tension (V)	Nbre des modules	Mode de pose
Pour la région d'Agadez											
1	0,25	275	[65 – 450]	12 -24	Mono cristallin	série M	100	400	12	4	2 en série et 2 en //
2	0,5	615	[350 – 1200]	72 - 96	Mono cristallin	série M	100	700	12	7	En série
3	1	1294	[660 – 1800]	72 - 96	Mono cristallin	série H	190	1520	24	8	4 en série et 2 en //
Pour la région de Tahoua											
1	0,25	194	[80 – 300]	24 - 48	Mono cristallin	série M	100	200	12	2	En série
2	0,5	550	[300 – 900]	48 - 72	Mono cristallin	série H	190	570	24	3	En série
3	1	1100	[660 – 1800]	72 - 96	Mono cristallin	série H	190	1520	24	8	4 en série et 2 en //

Les modules choisis sont de la marque monocristalline des puissances 100 et 190 Wc. Les modules seront montés en série pour le système 2 de la région d'Agadez et le système 1 et 2 de la région de Tahoua, les autres systèmes seront montés en 2 rangées égaux de nombre des modules.

➤ Calcul de section des câbles entre le coffret électrique et la pompe

Détermination de la section des câbles est en cuivre :

$$S = \frac{I_{cc} \times L \times \rho}{\Delta U\%} \quad (8)$$

- S = section du conducteur en cuivre exprimée en millimètres carrés ;
- L = longueur aller + retour du conducteur exprimé en mètres ;
- ρ : 0,017 Ω mm² /m en cuivre
- I_{cc} ou I_{max} = l'intensité exprimée en Ampères ;
- $\Delta U\%$ = Chute de tension acceptée au niveau des câbles exprimés en Volts.

Application pour la pompe de 0,25ha de 400 Wc pour la région d'Agadez

- Puissance $P = 400 \text{ Wc}$;
- Courant $I_{cc} = 18 \text{ A}$;
- La longueur $l = 60 \text{ m}$ entre le coffret électrique et la pompe aller et retour ;
- $\Delta U\% (5\%) = 1,2 \text{ V}$.

$$S = \frac{0,017 \times 60 \times 18}{1,2} = 15 \text{ mm}^2$$

Une section de 16 mm^2 est suffisante

Tableau XIII : Section des câbles entre le coffret électrique et la pompe

N°	Superficie (ha)	Puissance Installé	I _{cc}	$\Delta U\%$ maximale autorisée	$\Delta U\%$ raisonnable à priori	Section de câble calculée	Section de câble préférable	Longueur (m)
Pour la région d'Agadez								
1	0,25	400	18	5%	2,50%	15	16	60
2	0,5	700	9	5%	2,50%	4	4	60
3	1	1520	16	5%	2,50%	9	10	80
Pour la région de Tahoua								
1	0,25	200	9	5%	2,50%	8	10	60
2	0,5	570	8	5%	2,5%	5	6	60
3	1	1520	16	5%	2,5%	9	10	80

La section de câble varie de 4 mm^2 à 16 mm^2 entre le coffret électrique et la pompe.

- Calcul des sections des câbles du générateur PV au coffret électrique de longueur 5 m

Tableau XIV : Section des câbles du générateur PV au coffret électrique

N°	Superficie (ha)	Puissance Installé Wc	I _{cc}	Section de câble calculée en mm^2	Section de câble préférable en mm^2
Pour la région d'Agadez					
1	0,25	400	9	1	1,5
2	0,5	700	9	0,36	1,5
3	1	1520	8	0,28	1,5
Pour la région de Tahoua					
1	0,25	200	9	1	1,5
2	0,5	570	8	0,38	1,5
3	1	1520	8	0,28	1,5

VII.3. Calcul des conduites

La conduite se calcule par la formule hydraulique suivante :

$$Q = S \times V \begin{cases} Q \text{ m}^3/\text{s} \\ S \text{ m}^2 \\ V = 1 \text{ m/s} \end{cases} \quad D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{V * \pi}} \quad (9)$$

Tableau XV : Calcul des conduites

N°	Superficie (ha)	Besoin en eau(l/s)	Conduite Calculé (m)	Conduite (mm)	DN (mm) normalisé
1	0,25	0,58	0,027	27	DN 32
2	0,5	1,16	0,038	38	DN 40
3	1	2,31	0,054	54	DN 60

Les diamètres normalisés DN seront utilisés pour minimiser les pertes des charges dans les tuyauteries.

VII.4. Vérification des paramètres calculés

- ❖ Vérification des paramètres calculés

Tableau XVI : Vérification des paramètres

Liste de vérification	Paramètres des pompes		
	Calcul	Installé	Vérification
Puissance du générateur PV	275Wc	400 Wc	[65 – 450] ok
	615 Wc	700 Wc	[350 – 1200] ok
	1294 Wc	1520 Wc	[660 – 1800] ok
	194 Wc	200 Wc	[80 – 300] ok
	550 Wc	570 Wc	[300 – 900] ok
	1100 Wc	1520 Wc	[660 – 1800] ok
Tension d'entrée		24 V	24 V ok
		84 V	96 V ok
		96 V	96 V ok
		24 V	48 V ok
		72 V	72 V ok
		96 V	96 V ok

Les paramètres calculés sont tous dans l'intervalle de sécurité donnée par le catalogue de chaque pompe.

VII.5. Vérification de paramètre choisi

Nous avons choisi de pomper pendant 6 heures ; le paramètre 6 heures de pompage doit être vérifié par le calcul de la durée d'insolation moyenne. Les deux régions se situent au nord-ouest du Niger avec comme coordonnées :

- ❖ Agadez : 16° 58' 00''Nord, 7° 59' 00''Est
- ❖ Tahoua : 14° 53' 40''Nord, 5° 15' 52''Est

La durée d'insolation maximale S_0 est calculée par l'expression suivante :

$$S_0 = (2/15) \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10)$$

ϕ : La latitude de lieu 15° pour de site de la région de Tahoua, δ : La déclinaison

Tableau XVII : La moyenne d'insolation journalière

Mois	Durée d'insolation moyenne par [h/mois]	Durée d'insolation moyenne journalière [h/j]
Janvier	346,07	11
Février	321,43	12
Mars	369,16	12
Avril	371,03	12
Mai	395,20	13
Juin	388,07	13
Juillet	398,28	13
Août	388,11	13
Septembre	362,30	12
Octobre	360,17	12
Novembre	337,24	11
Décembre	342,97	11

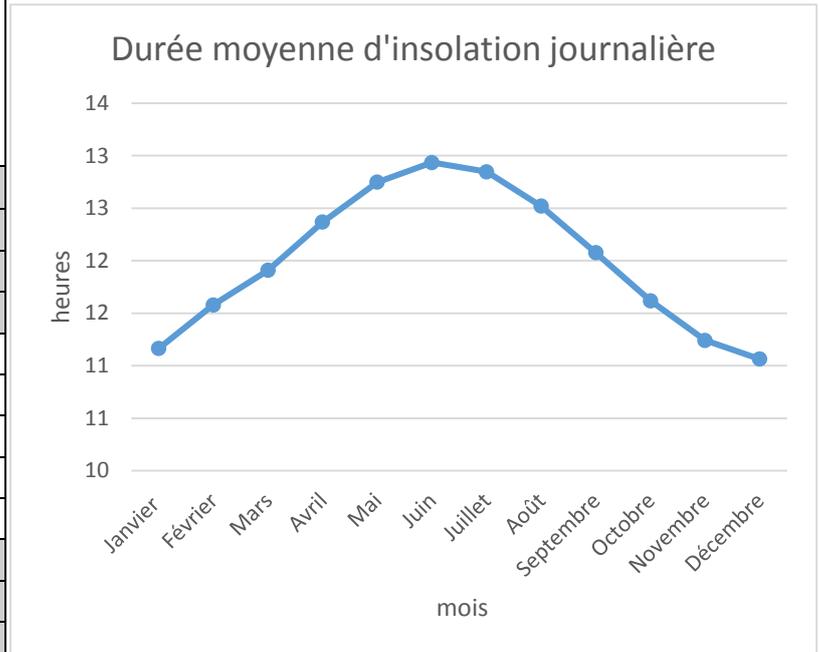


Figure 8 : Courbe de la moyenne d'insolation journalière

En retranchant considérant 2 heures et demi pour le lever du soleil et 2 heures et demi pour le coucher du soleil, l'enseuillement étant faible à ces périodes, nous aurons un temps d'insolation supérieur ou égal à 6 heures choisi pendant notre période de culture. Aussi, la durée d'insolation choisie pour le dimensionnement est largement suffisante pour ne pas que les systèmes de pompage de manque d'énergie.

VII.6. Installation du système

Pour installer le système PV, il y a une norme à respecter notamment la distance entre les rangées s'il y a lieu. Les modules de tous les systèmes sont tous en série mais on peut faire deux rangées. L'installation sera faite sur un terrain plat. A ce niveau, il nous faut calculer la distance entre deux rangées pour qu'il n'y ait pas d'ombre durant toute la période de culture.

❖ Calcul de la distance entre deux rangées

$$\text{La hauteur de deux modules } H \text{ [m]} = L \times \sin \alpha \quad (11)$$

La distance D entre les deux rangées $D [m] = \frac{L \times \sin[180 - \alpha - \varepsilon]}{\sin \varepsilon}$ (12)

La longueur L [m] (1,2m pour le PV de 100 Wc et 1,6 pour 190 Wc)

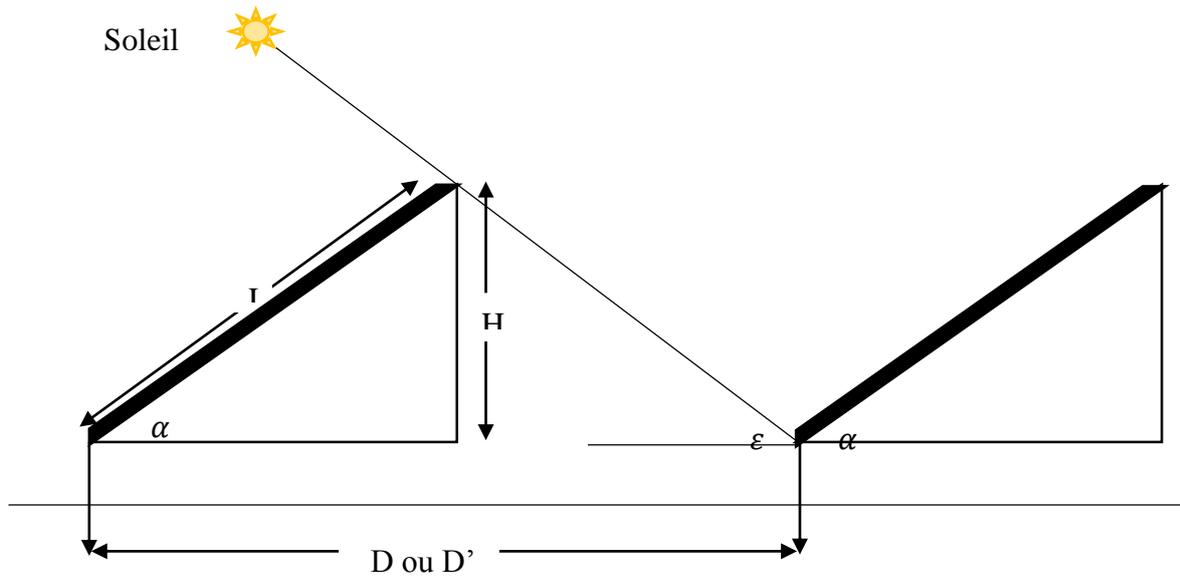
L'angle d'inclinaison du module $\alpha = 25^\circ$

L'angle solaire incident $\varepsilon [^\circ] = 90 - \text{latitude du site } (15^\circ) - \delta$ (13)

La déclinaison du 21 décembre $\delta [^\circ] = 23,45 \times \sin\left[\left(\frac{360}{365}\right) \times (jr + 284)\right]$ (14)

D [m] est la distance entre les rangées pour les modules de 100 Wc

D' [m] est la distance entre les rangées pour les modules de 190 Wc



- La déclinaison du 21 décembre $\delta = 23,45 \times \sin\left[\left(\frac{360}{365}\right) \times (355 + 284)\right] = -23,45^\circ$
- L'angle solaire incident $\varepsilon = 90 - 15 - 23,45 = 51,55^\circ$
- La distance D entre les deux rangées $D = \frac{1,2 \times \sin[180 - 25 - 51,55]}{\sin 51,55} = 1,5 \text{ m}$
- La distance D' entre les deux rangées $D' = \frac{1,6 \times \sin[180 - 25 - 51,55]}{\sin 51,55} = 2 \text{ m}$

Pour qu'il n'y ait pas d'ombre à la deuxième rangée, la distance entre les deux rangées doit être respectivement supérieure ou égale à 1,5 m et 2 m pour les modules de 100 Wc et 190 Wc.

❖ Exemple de principe de fonctionnement d'une installation

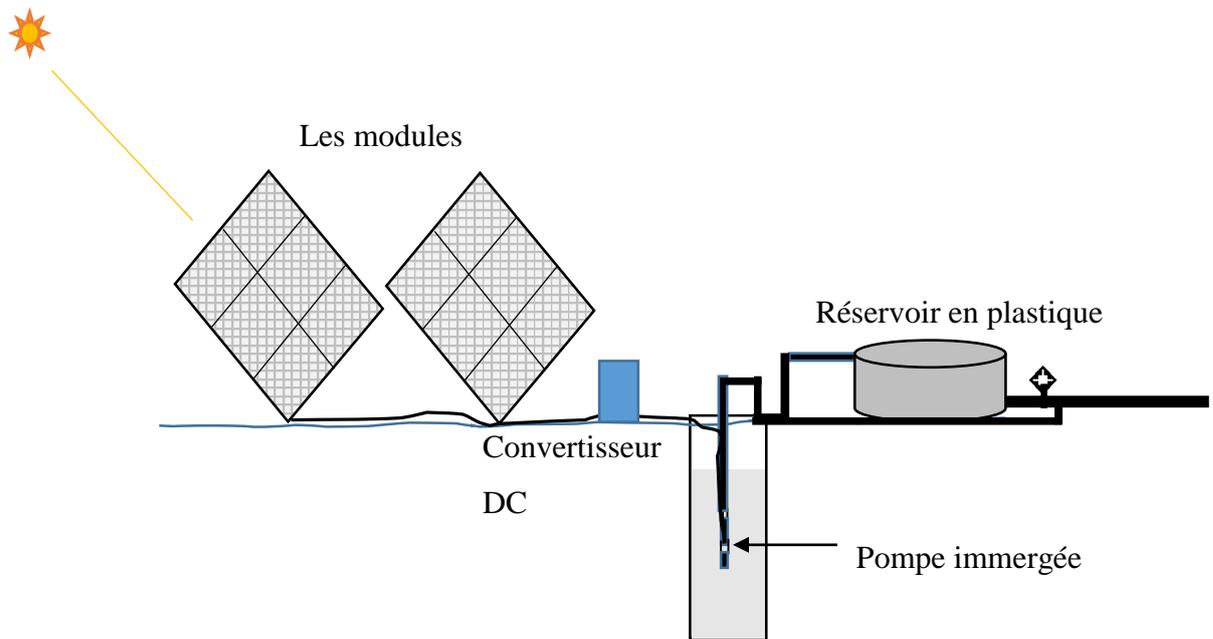


Figure 9 :Schéma de principe de fonctionnement de l'installation

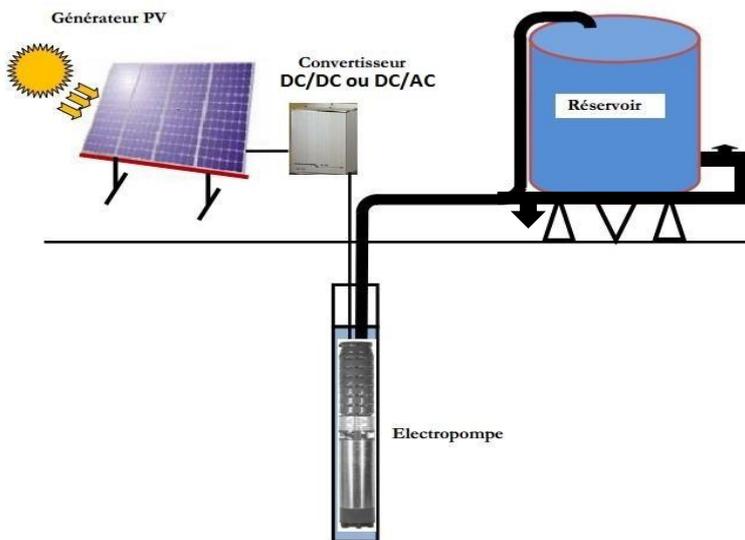


Figure 10 : Schéma synoptique de l'installation adoptée (Bachir, 2017)

VIII. Devis quantitatif et financier

Chaque pompe Lorentz vient avec son coffret et son convertisseur, les prix de ces équipements sont intégrés dans le prix de la pompe (GmbH, 2018).

VIII.1. Devis total du matériel

Tableau XVIII : Devis total du matériel

N°	Désignation	Nombre	Prix unitaire (FCFA)	Prix global (FCFA)
1	Pompe PS 150 C-SJ5-8	2	775 000	1 550 000
2	Pompe PS 200 HR-14	1	650 000	650 000
3	Pompe PS 600 C-SJ5-8	8	1 100 000	8 800 000
4	Pompe PS 1200 C-SJ8-5	11	1 600 000	17 600 000
5	Pompe SQFlex 7-4	21	2 300 000	48 300 000
6	Module mono cristallin 100W Série M	87	50 000	4 350 000
7	Module mono cristallin 190W Série H	192	70 000	13 440 000
8	Câbles DC 4 mm ² (40m)	11	16 000	176 000
9	Câbles DC 6 mm ² (30m)	8	16 000	128 000
10	Câbles DC 10 mm ² (30m)	22	20 000	440 000
11	Câbles DC 16 mm ² (30m)	2	22 000	44 000
12	Conduite DN 32 30 m	3	75 000	225 000
13	Conduite DN 40 30 m	19	75 000	1 425 000
14	Conduite DN 60 35 m	21	105 000	2 205 000
15	Coude DN 32 (5 par système)	3	37 500	112 500
16	Coude DN 40 (5 par système)	19	37 500	712 500
17	Coude DN 60 (5 par système)	21	45 000	945 000
18	Supports de 4 pieds	75	30 000	2 250 000
19	Réservoir en plastique 3 m ³	3	180 000	540 000
20	Réservoir en plastique 6 m ³	19	300 000	5 700 000
21	Réservoir en plastique 10 m ³	21	450 000	9 450 000
Total				119 043 000

Calcul du devis financier par exploitant

Tableau XIX : Exemple de calcul du devis financier par exploitant

Agadez		Tahoua	
0,25 ha		0,25 ha	
Pompe	775 000	Pompe	650 000
PV	200 000	PV	100 000
Câble	22 000	Câble	20 000
Conduite	75 000	Conduite	75 000
Coude	37 500	Coude	37 500
Support	30 000	Support	30 000
Réservoir	180 000	Réservoir	180 000
Total	1 319 500	Total	1 092 500

VIII.2. Devis financier par exploitant

Tableau XX : Devis financier par exploitant

N°	Superficie (ha)	Prix unitaire FCFA	Prix d'étude + Installation FCFA	Prix par exploitant FCFA	Prix global FCFA
Pour la région d'Agadez					
1	0,25	1 319 500	15%	1 552 353	3 104 706
2	0,5	2 438 500	15%	2 868 824	31 557 059
3	1	3 540 000	15%	4 164 706	49 976 471
Pour la région de Tahoua					
1	0,25	1 092 500	15%	1 285 294	1 285 294
2	0,5	1 768 500	15%	2 080 588	16 644 706
3	1	3 540 000	15%	4 164 706	37 482 353
Prix global du projet					140 050 588

VIII.3. Plan d'exécution du projet

Tableau XXI : Plan d'exécution

Désignation	0,25 ha	0,5 ha	1 ha	0,25 ha	0,5 ha	1 ha
	Pour Agadez			Pour Tahoua		
Pompe Lorentz / Grundfos	PS 150 C-SJ5-8	PS 1200 C-SJ8-5	SQFLEX 7-4	PS 200 HR-14	PS 600 C-SJ5-8	SQFLEX 7-4
La profondeur de la puits	19	21	22	14	19	19
Niveau dynamique	17	19	20	12	17	17
Le rabattement	4,5	6	5	4	7	6,5
Nbre de PV	4	7	8	2	3	8
Câble DC	16 mm ²	4 mm ²	10 mm ²	10 mm ²	6 mm ²	10 mm ²
Support	1	2	2	1	1	2
Conduite	DN 32	DN 40	DN 60	DN 32	DN 40	DN 60
Cinq coudes	DN 32	DN 40	DN 60	DN 32	DN 40	DN 60
Hauteur du réservoir	3 m	3 m	3,5 m	3 m	3 m	3,5 m
UN réservoir	3 m ³	5 m ³	10 m ³	3 m ³	5 m ³	10 m ³

IX. Analyse économique

Cette analyse économique est indispensable pour la prise de décision pour l'investisseur notamment l'état qui est initiateur de ce projet. Elle permet de comparer les prévisions et la réalité des projets. Elle permet aussi de quantifier la rentabilité des services rendus par l'électricité photovoltaïque aux exploitants. L'étude financière sert surtout à motiver les décideurs et les utilisateurs potentiels. Il faut toutefois noter que dans cette analyse, il est difficile de prendre en compte tous les coûts.

Il s'agit pour notre cas d'évaluer la viabilité économique de cet engagement financier ; en supposant que l'exploitant acquéreur du système solaire n'a recours qu'à un système bancaire d'emprunt. Nous occultons dans ces scénarios, toute intervention en matière d'apport en capitaux à titre de subventions gratuites.

Pour les calculs, les conditions ou les hypothèses suivantes sont retenues :

- ✓ Un taux d'indexation des combustibles = 0% ;
- ✓ Un taux d'inflation de 1,1 % généralement appliqué par certaines structures financières de la place ;
- ✓ La durée de vie du projet est ramenée à 10 ans : nous retenons cette hypothèse pour de multiples raisons. Si l'approvisionnement en énergie électrique ne fait aucun défaut pour vingt-cinq (25 ans) parce que constitué de modules solaires, nous sommes amenés cependant à observer une prudence sur la durée de vie du moteur qui dans plusieurs dispositions, reste au-delà de cette estimation ;
- ✓ Le paysan, utilisateur de la technologie, s'engage dans un ratio d'endettement de 95% ;
- ✓ Un taux d'intérêt : 12% imposé par le TDR du projet ;
- ✓ Les déductions d'impôts sont nulles. Aujourd'hui, la technologie est exemptée de toute taxe.
- ✓ C'est en tenant compte de toutes ces hypothèses, des coûts d'acquisition et de maintenance des deux technologies (motopompe à essence & pompe solaire) que nous avons mesuré le temps de retour sur investissement dans l'optique d'un choix approprié.

IX.1. Etude économique pour 1 ha

IX.1.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement pour 1 ha s'élève à 4 164 706 FCFA pour les régions Agadez et Tahoua. Pour les autres superficies, l'étude se focalise donc sur la région d'Agadez pour laquelle l'investissement est plus élevé quand on considère la superficie de culture.

IX.1.2. Dépenses d'exploitation

Nous avons 25 installations dans la région d'Agadez, pour assurer leur sécurité un technicien sera recruté pour la maintenance et la gestion mensuel des équipements à 250 000 FCFA en raison de 10 000 FCFA par système et par mois. La dépense annuelle d'un système pour la maintenance est estimée à 70 000 FCFA/an.

Le terrain sera exploité par deux exploitants avec un salaire de 50 000 FCFA/mois, les prix des grains et des insecticides sont estimés à 200 000 FCFA/an. Ce qui fait une dépense totale pour les 7 mois d'utilisation de 900 000 FCFA/an. La dépense annuelle totale est de 970 000 FCFA.

Tous ces chiffres la dépense d'exploitation ont été donnée par la commission d'enquête du projet de gestion de risque.

IX.1.3. Estimation des recettes

Si tout est respecté, la production débutera dès le troisième mois avec 2 récoltes par année. La recette minimale est estimée à 1 300 000 FCFA par récolte ; ce qui équivaut à une recette annuelle de 2 600 000 FCFA/an.

IX.1.4. Rentabilité financière du projet

Données de base :

- Investissement initial 4 164 706 FCFA pour les équipements de 1 ha ;
- Encouragements et subventions 5% de l'investissement soit 208 235 FCFA ;
- Dépenses annuelles d'exploitation sont de 970 000 FCFA ;
- Recettes minimales annuelles sont de 2 600 000 FCFA ;
- Taux d'actualisation (taux d'intérêt + taux d'inflation) de 13,1 % (i) ;
- Durée de vie de projet : on considère une durée de vie des équipements de projet de 10 ans.

IX.1.5. Calcul de la valeur actuelle nette (VAN)

La valeur nette actuelle est la somme du coût d'investissement, d'exploitation et de la valeur des équipements 10 ans après le projet.

$$VAN = -CF_0 + \frac{CF_1}{(1+i)} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \frac{CF_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} + \frac{R}{(1+i)^n} \quad (15)$$

- CF_0 est l'investissement initial pour les équipements de 1 ha par l'exploitant, $CF_0 = 95\%$ de l'investissement du projet correspond à 3 956 471 FCFA ;
- CF_n : Recette - dépense annuelle = 1 630 000 FCFA ;
- R : Valeur des équipements après le projet amortissement ;
- n : l'année.

$$R = \text{Valeur nette comptable} \times \text{taux d'amortissement dégressif} \quad (16)$$

Pour une durée d'amortissement supérieure à 6 le coefficient d'amortissement est 2,25.

$$\text{Taux d'amortissement dégressif} = \text{coefficient} \times \frac{1}{\text{durée du projet}} \quad (17)$$

$$R = 2,25 \times \frac{1}{10} \times 4\,164\,706 = 937\,060 \text{ FCFA}$$

VAN = 5 126 685 FCFA

La valeur actuelle nette est supérieure à zéro, du point de vue économique le projet est réalisable. Nous optons pour les différents scénarios, le calcul sans dette et le calcul avec 95% de dette.

IX.2. Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 1 ha

Si l'exploitant finance lui-même le projet sans la dette c'est-à-dire 95% du montant dudit projet, nous aurons les résultats dans la figure ci-dessous. Pour notre analyse financière le logiciel RESTScreen4 sera utilisé. Après l'introduction des données et une simulation nous avons :

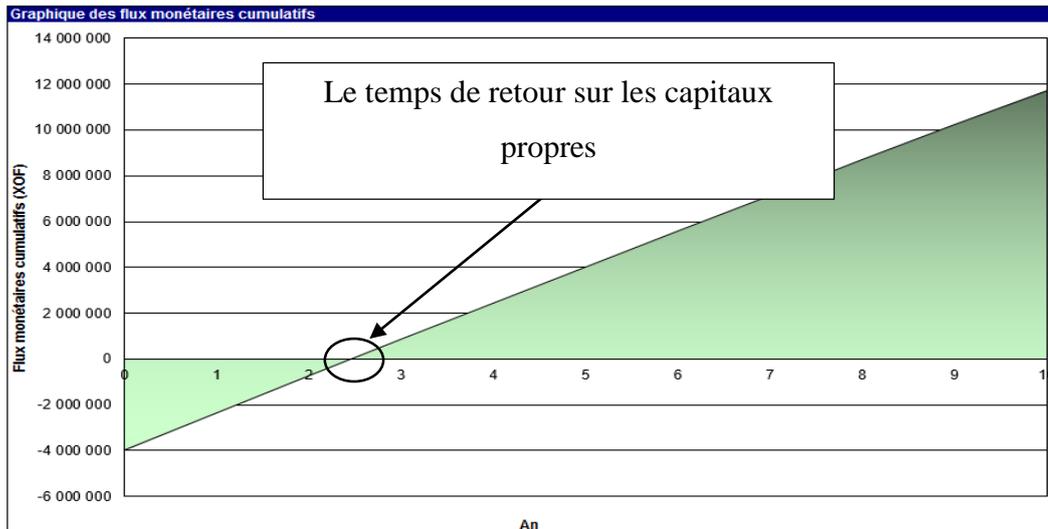


Figure 11 : La rentabilité du projet sans la dette pour un hectare

Lorsque le projet est financé intégralement sans la dette, le taux d'actualisation est inférieur au taux interne du rendement (TRI), cela prouve que le projet est positif. Le retour simple et le retour sur les capitaux propres sont 2,4 ans et 2,5 ans respectivement. La valeur de flux cumulée est de 11 737 000 FCFA sur les 10 ans du projet pour plus d'information veuillez voir l'annexe V.

IX.3. Calcul de la rentabilité du projet avec 95% de dette du coût du projet pour un hectare

Il est prévu dans le TDR du projet, un soutien financier de 5% pour les bénéficiaires quelle que soit la superficie soit, 208 235 FCFA et 3 956 471 FCFA d'emprunt pour un hectare. Plusieurs scénarios ont été étudié pour le remboursement de la dette. Après, les simulations sur le logiciel RESTScreen4, nous avons les résultats dans le tableau suivant :

Tableau XXII : Rentabilité du projet pour 1ha avec 95% de dette

1 ha	Dette étalée sur 3 ans	Dette étalée sur 4 ans
Investissement initial	3 956 471	3 956 471
Encouragement	208 235	208 235
Exploitation et entretien	970 000	970 000
Total des économies et des revenus annuels	2 600 000	2 600 000
Paiements de la dette	1 647 273	1 302 606
Total des frais annuels et paiements de la dette	2 617 273	2 272 606
Retour simple	2,4 ans	2,4 ans
Retour sur les capitaux propres	immédiat 3 ans	immédiat 4 ans
Valeur Actualisée Nette (VAN)	4 968 812	4 968 812
Économies annuelles sur la durée de vie	879 401	879 401
Recouvrement de la dette	0,97	1,22

Flux monétaire cumulé	10 751 533	10 482 925
-----------------------	------------	------------

➤ Cas 1 : Dette étalée sur 3 ans pour un hectare

Il est impossible de rembourser les frais en 3 ans sans l'aide extérieure. En effet, une dette contractée pour trois ans exige de la part de l'exploitant agricole qui est l'emprunteur. En effet, ce n'est pas possible que l'exploitant rembourse au-delà de ce qu'il gagne par an. Par ailleurs, s'il arrive à rembourser la dette sur les 3 ans des dix années du projet, il économisera plus de 10,7 millions de francs CFA. Pour plus de détaille veuillez voir annexe VI.

➤ Cas 2 : Dette étalée sur 4 ans pour un hectare

Lorsque l'emprunteur décide de payer ses dettes en 4 ans ; on observe dans le tableau ci-dessus et dans l'annexe VII un temps de retour simple de 2,4 ans sur les capitaux propres investis. Si ce cas présente pour l'exploitant moins de pression financière pour le remboursement de la dette, il a en revanche, moins de profit en termes de flux monétaires cumulés 10,4 millions de FCFA et une valeur actualisée nette qui reste inférieure au premier scénario mais nettement positive.

IX.4. Etude économique pour 0,5 ha

IX.4.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement pour 0,5 ha s'élève à 2 868 824 FCFA pour la région d'Agadez et 2 080 588 FCFA pour la région de Tahoua. L'étude se focalise donc sur la région d'Agadez pour laquelle l'investissement est plus élevé quand on considère la superficie de culture. Les données de bases sont :

- Investissement initial 2 868 824 FCFA pour les équipements ;
- $CF_0 = 2\,725\,383$ FCFA soit 95% du montant du projet ;
- $CF_n = \text{Recette} - \text{dépense annuelle} = 880\,000$ FCFA ;
- Encouragements et subventions 5% de l'investissement soit 143 441 FCFA ;
- Dépenses annuelles d'exploitation sont de 520 000 FCFA ;
- Recettes minimales annuelles sont de 1 400 000 FCFA ;
- R : Valeur d'amortissement des équipements : 645 500 FCFA ;
- Taux d'actualisation de 13,1 % (i) ;
- Durée de vie de 10 ans : on considère une durée de vie des équipements de projet de 10 ans.

➤ La valeur actuelle nette est :

$$VAN = 2\,220\,000 \text{ FCFA}$$

Pour une superficie de 0,5 ha, La valeur actuelle nette est supérieure à zéro donc du point de vue économique le projet est réalisable à 0,5 ha. Nous optons pour les différents scénarios.

IX.4.2. Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 0,5 ha

Lorsque l'exploitant finance le projet sans la dette c'est-à-dire 95% du montant dudit projet, nous aurons les résultats dans la figure ci-dessous. Après l'introduction des données et une simulation nous aurons :

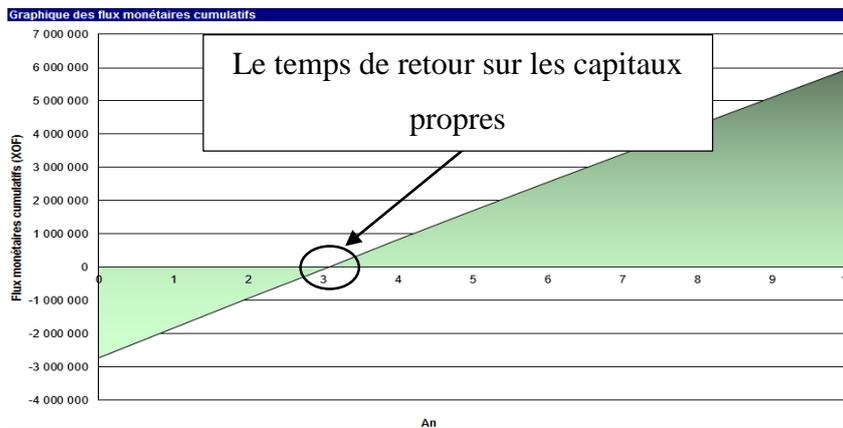


Figure 12 : La rentabilité du projet sans la dette pour 0,5 ha

Lorsque le projet est financé intégralement sans la dette, le taux d'actualisation est inférieur au taux interne du rendement, cela prouve que le projet est positif. Le retour simple et le retour sur les capitaux propres sont 3,1 ans et 3,1 ans respectivement. Le flux monétaire sur la durée de vie du projet est de 5,7 millions de franc CFA soit 574 000 FCFA par an. Voir annexe VIII.

IX.4.3. Calcul de la rentabilité du projet avec 95% de dette du coût du projet pour 0,5 ha

Lorsque l'agriculteur décide d'emprunter nous aurons les résultats de deux scénarios dans le tableau suivant :

Tableau XXIII : La rentabilité du projet avec 95% de dette sur le coût du projet pour 0,5 ha

0,5 ha	Dette étalée sur 4 ans	Dette étalée sur 5 ans
Investissement initial 95%	2 725 383	2 725 383
Encouragement 5%	143 441	143 441
Exploitation et entretien	520 000	520 000
Total des économies et des revenus annuels	1 400 000	1 400 000
Paiements de la dette	897 290	756 048
Total des frais annuels et paiements de la dette	1 417 290	1 276 048

Retour simple	3,1 ans	3,1 ans
Retour sur les capitaux propres	immédiat 4 ans	immédiat 5 ans
Valeur Actualisée Nette (VAN)	2 094 000	2 094 254
Économies annuelles sur la durée de vie	370 650	370 650
Recouvrement de la dette	0,95	1,13
Flux monétaire cumulé	4 886 000	4 694 547

Pour 0,5 ha, on constate qu'il est impossible de rembourser les frais en 4 ans sans l'aide extérieure. En effet, ce n'est pas possible que l'exploitant rembourse au-delà de ce qu'il gagne par an. Mais, s'il arrive à rembourser la dette sur les 4 ans des dix années du projet, il économisera plus de 4,8 millions de francs CFA. Pour que le projet soit rentable et que l'exploitant soit libre pour le remboursement de sa dette, il faut 5 ans avec un profit en termes de flux monétaires cumulés de 4,6 millions et un TRI nettement positif. Voir annexe IX et X

IX.5. Etude économique pour 0,25 ha

IX.5.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement pour 0,25 ha s'élève à 1 552 353 FCFA pour les régions Agadez et 1 285 294 pour la région de Tahoua. L'étude se focalise donc sur la région d'Agadez pour laquelle l'investissement est plus élevé quand on considère la superficie de culture. Les données de bases sont :

- Investissement initial 1 552 353 FCFA pour les équipements ;
- $CF_0 = 1\,474\,735$ FCFA soit 95% du montant du projet ;
- $CF_n = \text{Recette} - \text{dépense annuelle} = 450\,000$ FCFA ;
- Encouragements et subventions 5% de l'investissement soit 77 618 FCFA ;
- Dépenses annuelles d'exploitation sont de 350 000 FCFA. ;
- Recettes minimales annuelles sont de 800 000 FCFA ;
- R : Valeur d'amortissement des équipements : 350 000 FCFA ;
- Taux d'actualisation de 13,1 % (i) ;
- Durée de vie de 10 ans : on considère une durée de vie des équipements de projet de 10 ans.

➤ La valeur actuelle nette est :

$$VAN = 1\,059\,334 \text{ FCFA}$$

La valeur actuelle nette est positive montre que le projet est réalisable sur le plan économique. Nous optons pour les différents scénarios.

IX.5.2. Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 0,25 ha

Lorsque l'exploitant finance le projet sans la dette c'est-à-dire 95% du montant du projet, nous aurons les résultats dans la figure ci-dessous. Après l'introduction des données et une simulation nous aurons :

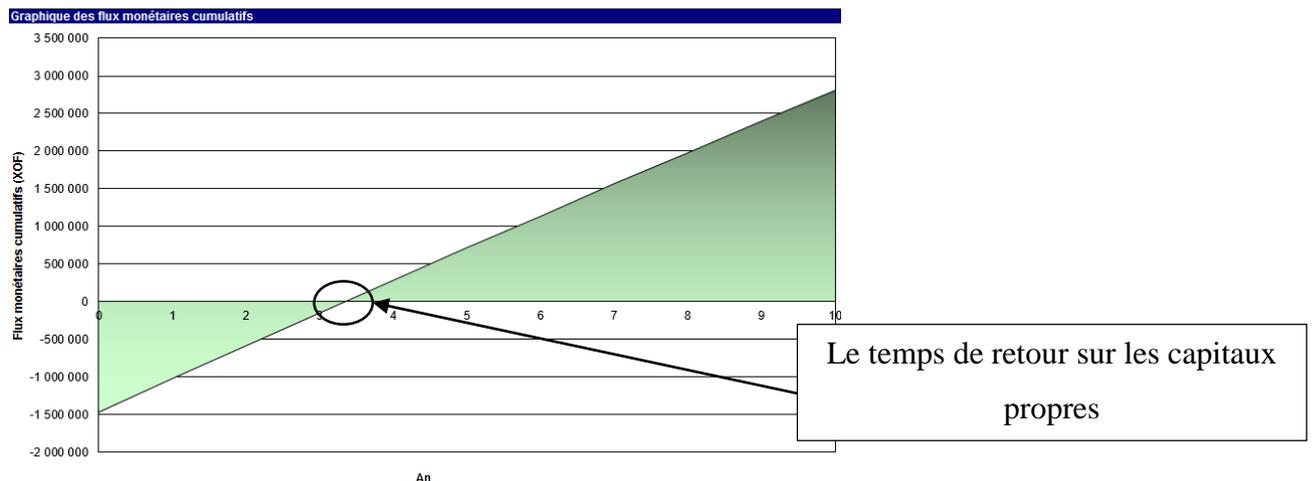


Figure 13 : Rentabilité du projet sans la dette pour 0,25 ha

Pour une superficie de 0,25 ha, la rentabilité du projet lorsque l'exploitant finance 1 474 735 francs CFA soit 95% du montant du projet c'est-à-dire sans dette ; le temps de retour sur les capitaux propres est de 3,3 ans, le flux monétaire est 2,8 millions, économies annuelles sur la durée de vie du projet est de 280 000 FCFA et un ratio avantage coût de 2,9. Voir annexe XI

IX.5.3. Calcul de la rentabilité du projet avec 95% de dette du coût du projet pour 0,25 ha

D'après nos simulations, il est impossible de rembourser les frais en 4 ans sans avec ce qu'il gagne donc nous optons le remboursement pour les 5 ans ainsi, nous aurons les résultats suivants :

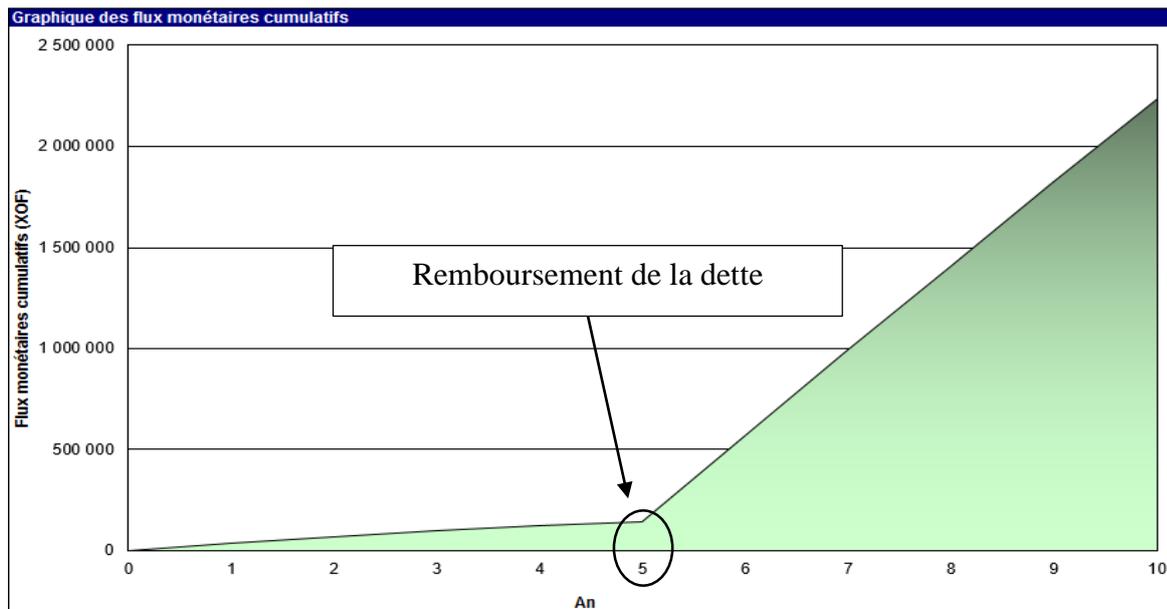


Figure 14 : La rentabilité sur 5 ans pour 0,25 ha

D'après la figure 13, la viabilité du projet est de 5 ans sur le 0,25 ha, la valeur d'actualisation est inférieure au taux interne de rendement (TRI). Cette valeur est largement positive. Avec une telle situation l'exploitant a plus de liberté pour le paiement de la dette et il économisera près de 2 235 000 FCFA sur la durée de vie du projet. Voir annexe XII

IX.6. Synthèse de l'analyse économique

Quel que soit le scénario choisi et même à des emprunts à des taux d'intérêt importants, l'utilisation de pompage solaire présente d'importants avantages en termes de rendement économique. Pour ce qui est du revenu et le coût d'exploitation, nous avons pris la moyenne des prix pour nous placer dans une situation beaucoup plus avantageuse, et la valeur actualisée nette est largement positive, ce qui montre la viabilité d'un tel projet. Le projet sera plus rentable dans la région de Tahoua qu'Agadez à cause de la différence des prix d'investissement pour une même superficie.

Lorsque l'investissement est de petite taille ou de taille moyenne (sur 0,25 ha et 0,5 ha), la durée de la rentabilité du projet augmente d'un an par rapport à un hectare avec les fonds propres ou avec la dette tous deux à 95 % du montant du projet, lorsque celui-ci sera réalisé.

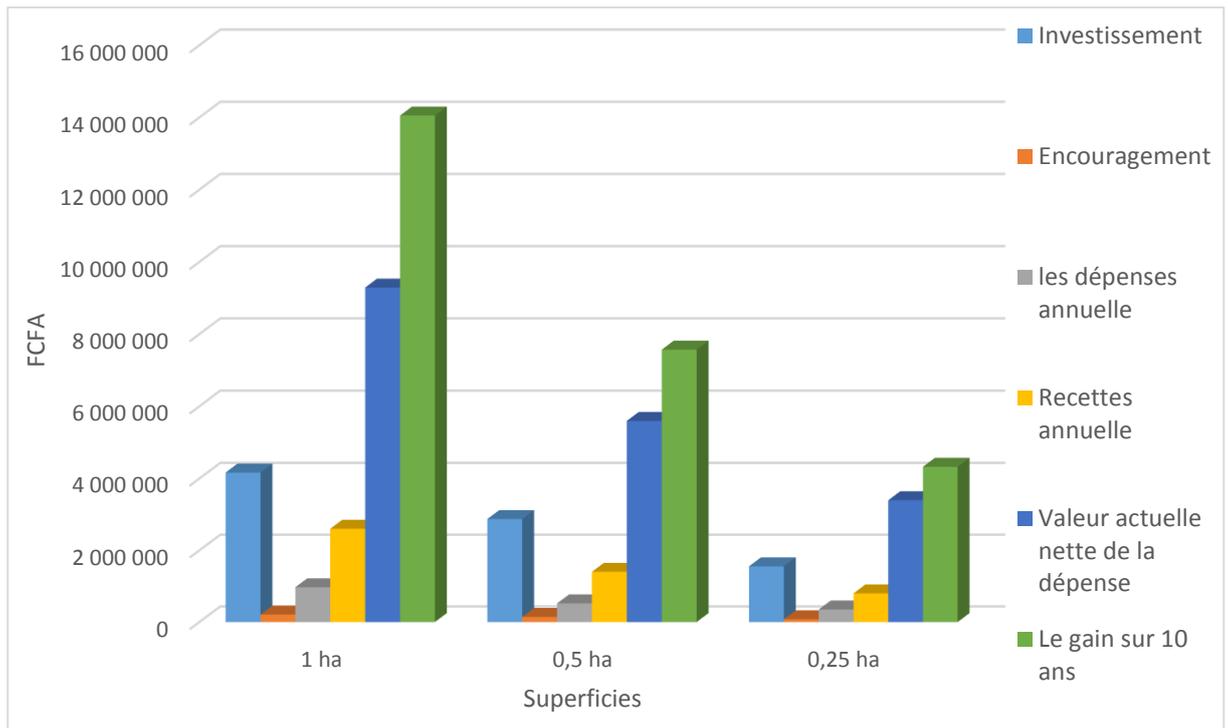


Figure 15 : Synthèse de données financière

D'après, la figure 15 on constate que le gain du projet sur 10 ans est supérieur à la valeur actuelle nette qui est la charge du projet sur 10 ans. Ça prouve une fois de plus que le projet est financièrement réalisable.

X. Conclusion et recommandations

L'approvisionnement en eau pour les cultures maraichères par le système de pompage solaire est un système qui demeure encore cher pour les paysans du Niger malgré la forte baisse du prix de certains équipements ces dernières années. Le pompage solaire photovoltaïque sur un puits/ forage est d'une fiabilité exceptionnelle qui n'exige aucun suivi particulier. La plupart des interventions de maintenance sur ces systèmes ne font pas appel à des changements fréquents de pièces. (A. Hadj Arab, Octobre 1999)

D'après notre analyse économique, la perspective de substitution des motopompes classiques par des systèmes solaires pour 1 ha, demande un investissement de 4 164 706 francs CFA avec un taux de 5 % d'encouragements et subventions sur l'investissement. Le temps de retour simple sur les capitaux propres lorsque l'exploitant décide de payer sans dette est de 2,5 ans ; lorsqu'il fait appel à des emprunts à hauteur de 95%, le temps de remboursement est de 4 ans avec un ratio avantage coût (recouvraient de la dette) de 1,22. Cette proposition se présente favorable au vu de cette analyse économique avec une durée de vie du projet de 10 ans. Par contre, si l'exploitant a une petite superficie (0,25 à 0,5 ha) l'investissement est respectivement de 1 552 353 francs CFA et 2 868 824 francs CFA. Le temps de retour sur les capitaux propres est de 3,3 ans. A la fin il est possible aux paysans d'étendre les surfaces d'irrigation sans incidence majeure sur leurs budgets d'investissements.

Pour ce qui est des recommandations, nous proposons que :

- ✓ Pour des raisons économiques d'installer un seul système de pompage pour les sites proches, cela permettra de diminuer le coût d'investissement ;
- ✓ Pour des raisons économiques de diminuer le taux d'intérêt pour que le temps de retour sur les capitaux propres soit minimal ;
- ✓ Le choix des pompes et des équipements se fasse conformément aux spécifications techniques données ci-haut ;
- ✓ Pour des raisons de sécuriser des puits, un couvercle en acier de 15/10 à 20/10 mm muni de barre transversale en acier UPN, afin d'empêcher l'ensablement du système de pompage ou son effondrement et faciliter la pose de la pompe solaire ainsi qu'une margelle d'au moins 1m du sol.

XI. Bibliographie

A. Hadj Arab F. Chenlo Performance of PV water Pumping Systems [Article] // Estimation of daily flow rate of photovoltaic water pumping systems using solar radiation data. - Madinah-Saudi Arabi : Renewable Energy, Octobre 1999.

Bachir Ben Ahmed Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque [Ouvrage]. - Ouargla : Kasdi Merbah Ouargla, 2017.

D.Thévenard and M.Ross validation and Verification of Component Models and [Ouvrage]. - Canada : [s.n.], 2003.

FAO Besoins et prélèvements d'eau pour l'irrigation par pays [En ligne] // Evaluation des besoins au Niger. - Rome-Italie, 2015. - 09 Mai 2019.

Geneve Comité Internationnal Guide pratique pour les essais de pompage de puits [Ouvrage]. - Genève, Suisse : Comité International de Genève, 2011.

GmbH BERNT LORENZ document-jtkbrx45z Lorenz.pdf [Article]. - Paris - France : APB-ENERGY, 2018.

GOUDOU Simon Modelisation des systèmes de pompage et détermination du point d'équilibre par méthodes numérique [Ouvrage] / éd. THIS Ecole polytechnique de. - 1991.

Hadiza ISSAKA NOMAO et Fanta MADY Potentiels Energétiques du Niger [Ouvrage] = Potentiels Energétiques du Niger. - Ouagadougou : Fondation 2ie, 2016.

Hadj Arab M. Benghanem A. Gharbi Dimensionnement de Système de Pompage Photovoltaïque [Ouvrage]. - Alger : Renewable Energy, 2005.

Jimmy Royer [et al.] Le pompage solaire photovoltaïque [Ouvrage]. - Ottawa : Agence de la francophonie, 1998. - <http://www.iepf.org>.

LIGRING Lary Étude pour la mise en place du système de pompage solaire d'un champ de neuf hectare [Ouvrage]. - Ouagadougou - Burkina Faso : [s.n.], 2012. - Vol. Fondation 2iE.

LOUAZENE Mohamed Lakhdar Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque [Ouvrage]. - Ouargla : [s.n.], 2008.

MEEKHUN Darigo Réalisation d'un système de conversion et de gestion d'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'un séreaux de capteur sans fil autonomes pour l'application aéronautique [Ouvrage]. - Toulouse - France : Institut National des Science de Toulouse, 2016.

Molle B. Les stations de pompage individuelle pour l'irrigation [Ouvrage]. - Juin 1996.

Royel Djako Le Pompage photovoltaïque [Ouvrage]. - [s.l.] : Université d'Ottawa, 2012.

Soleil Alliance Principe de dimensionnement et étude de cas, Pompage au fil de soleil [Ouvrage]. - Paris : Alliance Soleil, 2016.

Liste des annexes

Annexe I: Les données de la région d'Agadez.....	45
Annexe II: Les données de la région de Tahoua	46
Annexe III : Pompe solaire Lorentz immergée Unité de pompage à centrifuge	47
Annexe IV : Catalogue de PV	50
Annexe V : Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 1 ha	51
Annexe VI : Dette étalée sur 3 ans	53
Annexe VII : Dette étalée sur 4 ans pour un hectare.....	55
Annexe VIII : Rentabilité du projet pour 0,5 ha sans la dette	57
Annexe IX : Rentabilité du projet pour 0,5 ha avec 95% de dette étalée sur 4 ans	59
Annexe X : Rentabilité du projet pour 0,5 ha avec 95% de dette étalée sur 5 ans.....	61
Annexe XI : Rentabilité du projet pour 0,25 ha sans la dette.....	63
Annexe XII : Rentabilité du projet pour 0,25 ha avec 95% de dette étalée sur 5 ans	65

XII. Les Annexes

Annexe I: Les données de la région d'Agadez

Les données pour la région d'Agadez						
Exploitant	Superficie (ha)	Type d'ouvrage	Profondeur mesurée (m)	Niveau statique mesuré(m)	Culture présent	Technologie utilisée
Les sites de la Vallée d'Emassakmane						
Ousmane Moussa	0,5	puits	13,5	7	Maraichers	Motopompe diesel
Hayatan Amminna	0,5	puits	11	5,5	Maraichers	
Ibrahim Amminna	0,5	puits	13,5	6,5	Maraichers	
Les sites de la vallée de Kelfodete						
Almoustapha Alousseini	0,5	puits	14,5	8	Maraichers	Motopompe diesel
Assadeck Alousseini	0,5	puits	12	8	Maraichers	
Les sites de la Vallée d'Azal						
Sidi Alkassoume	0,6	puits	9	6	Maraichers	Motopompe diesel
Tambo Awakasse	0,6	puits	9	7	Maraichers	
Idrissa Islama	0,5	puits	15	7	Maraichers	
Moussa Ahmed	0,5	puits	10	3	Maraichers	
Les sites de la Vallée de Tanout n'ghaidam						
Aboubacar Elh	0,25	puits	12	7,5	Maraichers	Motopompe diesel
Alhassane Ousseini Ahamat	0,25	puits	9	7	Maraichers	
Les sites de la Vallée de Tagazer						
Toumouna Assalek	4	puits	14	8	Maraichers	Motopompe diesel
Agali Ibrahim	2,5	puits	15	10	Maraichers	
Djibrilla Amoumounne	2	puits	14	9	Maraichers	
Sadda Alhassane	0,8	puits	14,5	9	Maraichers	
Souleymane Abdouwa	3,5	puits	14,5	9	Maraichers	

Annexe II: Les données de la région de Tahoua

Exploitant	Superficie (ha)	Type d'ouvrage	Profondeur mesurée (m)	Niveau statique mesuré m	Débit obtenu (m ³ /jour)	Débit obtenu par hectare	Culture présent	Technologie utilisée
Les sites de Tchiara								
Abdou kamayé	1,36	forage	8	4	97,344	72	Légume	Motopompe diesel
Abdoulkarim kadri	0,46	forage	8	4	52,624	114	Légume	
Ali Issoufou	0,51	forage	8	4	52,416	103	Légume	
Djafarou amadou	1,07	forage	10,5	5	63,936	60	Légume	
Djamaïdou Ousman	0,54	forage	8	4	67,68	125	Légume	
Ibro Assoumane	1,47	forage	10	4	87,68	60	Légume	
Illa abdou	0,59	forage	10	5,5	57,6	98	Légume	
Illa adamou	0,89	forage	8	4	91,296	103	Légume	
Illia Yacoubou	0,95	forage	8	4	84,352	89	Légume	
Laouali Dari	1,27	forage	8	4	82	65	Légume	
Maman abdou	0,17	forage	8	4	47,808		Légume	
Mamane ouma	1,13	forage	8	4	82,08	73	Légume	
Yaou Mahaman	0,92	forage	8	4	76,608	83	Légume	
Les sites de Bagaroua								
Adamou Djibo	0,5	forage	11,6	4,7	77,76		Légume	Motopompe diesel
Issa Toullé	0,7	forage	11,6	5	70,848	101	Légume	

Annexe III : Pompe solaire Lorentz immergée Unité de pompage à centrifuge



- Pompe pour le 0,25 ha da la région d'Agadez page 5 du catalogue

PS150	C-SJ5-8
N° Article	2100
Hauteur manométrique [m]	0-22
Débit max. [m3/h]	5,0
Rendement max. [%]	45
Fonctionnement solaire	
Tension nominale 12-24 V DC	
Tension en circuit ouvert max. 50 V DC	
Générateur solaire [Wp] 65-450	
Fonctionnement sur batteries	
Tension nominale 12-24 V DC	

- Pompe choisie pour la superficie de 0,5 ha de la région d'Agadez page 12 du catalogue

PS1200	C-SJ5-8	C-SJ8-5	C-SJ12-3
N° Article	1222	1223	1224
Hauteur manométrique [m]	0-40	0-24	0-15
Débit max. [m ³ /h]	7,5	11	21
Rendement max. [%]	48	48	48
Fonctionnement solaire Tension nominale 72-96 V DC Tension en circuit ouvert max. 200 V DC			
Générateur solaire [Wp]	350-1200	350-1200	350-1200
Fonctionnement sur batteries Tension nominale 72-96 V DC			

- Pompe choisie pour la superficie de 1 ha de deux régions Catalogue Grundfos

SQF 11A-3 Hmt max: 15m Max: 19m ³ /h
SQF 7-4 Hmt max: 35m Max: 12m ³ /h
SQF 9-3 Hmt max: 25m Max: 16m ³ /h

- Pompe choisie pour la superficie de 0,25 ha de la région de Tahoua page 8 du catalogue

PS200	HR-04	HR-07	HR-14
N° Article	1007-X	1009-X	1008-X
Hauteur manométrique [m]	0-50	0-30	0-20
Débit max. [m ³ /h]	0,8	1,2	2,7
Rendement max. [%]	60	61	62
Fonctionnement solaire Tension nominale 24-48 V DC Tension en circuit ouvert max. 100 V DC			
Générateur solaire [Wp] 80-300			
Fonctionnement sur batteries Tension nominale 24-48 V DC			

➤ Pompe pour le 0,5 ha de la région de Tahoua page 10 du catalogue

PS600	C-SJ5-8	C-SJ8-5
N° Article	1292	1293
Hauteur manométrique [m]	0-25	0-18
Débit max. [m ³ /h]	7,5	11
Rendement max. [%]	47	47
Fonctionnement solaire		
Tension nominale 48-72 V DC		
Tension en circuit ouvert max. 150 V DC		
Générateur solaire [Wp]	300-900	300-900
Fonctionnement sur batteries		
Tension nominale 48 V DC		

Annexe IV : Catalogue de PV



DESCRIPTION

Module photovoltaïque monocrystallin 100 WP Série M

CARACTERISTIQUES

Puissance Pmax [Wp] 100, tolérance [%] + 10/- 10
Vmp: 17.4 V
Garantie matériel: 2 ans
Garantie de rendement: 90% à 5 ans
Dimension [mm] 550 × 1,210 × 35



DESCRIPTION

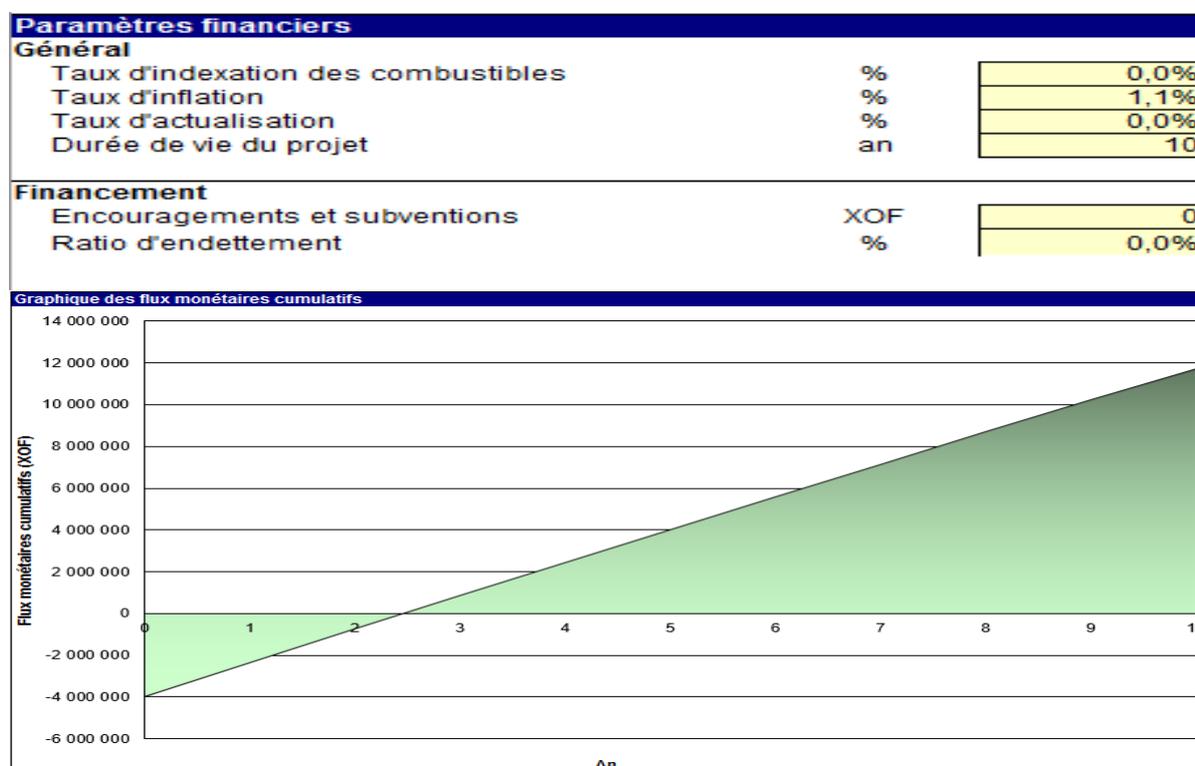
Module photovoltaïque monocrystallin 190 WP Série H

CARACTERISTIQUES

Puissance Pmax [Wp] 190, tolérance [%] + /-
Vmp: 43,3 V
Garantie matériel: ans
Garantie de rendement: % à 5 ans
Dimension [mm] 800.1,6.35

Annexe V : Calcul de la rentabilité du projet sans la dette pour 1 ha

Annexe V.1



Annexe V.2

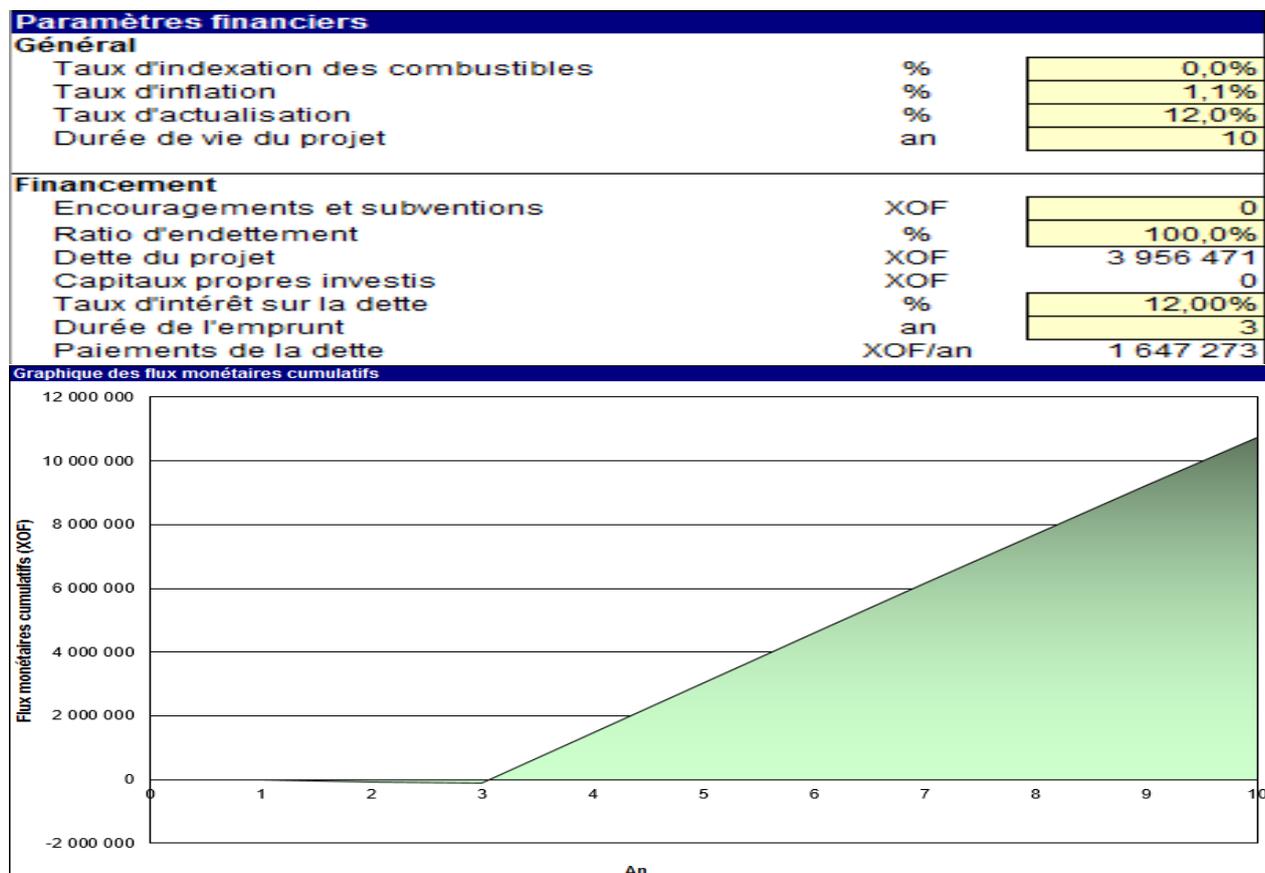
Viabilité financière			Flux monétaires annuels			
TRI avant impôt - capitaux propres	%	38,8%	An	Av. impôt	Apr. impôt	Cumulatif
TRI avant impôt - actifs	%	38,8%	#	XOF	XOF	XOF
TRI après impôt - capitaux propres	%	38,8%	0	-3 956 471	-3 956 471	-3 956 471
TRI après impôt - actifs	%	38,8%	1	1 619 330	1 619 330	-2 337 141
Retour simple	an	2,4	2	1 608 543	1 608 543	-728 598
Retour sur les capitaux propres	an	2,5	3	1 597 637	1 597 637	869 038
Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF	11 736 880	4	1 586 611	1 586 611	2 455 649
Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an	1 173 688	5	1 575 463	1 575 463	4 031 112
Ratio avantages-coûts		3,97	6	1 564 193	1 564 193	5 595 306
Coût de réduction de GES	XOF/CO2	(683 662)	7	1 552 799	1 552 799	7 148 105
			8	1 541 280	1 541 280	8 689 385
			9	1 529 634	1 529 634	10 219 020
			10	1 517 860	1 517 860	11 736 880

Annexe V.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	3 956 471
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	3 956 471
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	970 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	970 000
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	2 600 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	2 600 000

Annexe VI : Dette étalée sur 3 ans

Annexe VI.1



Annexe VI.2

Viabilité financière			Flux monétaires annuels			
TRI avant impôt - capitaux propres	%	272,3%	An	Av. impôt	Apr. impôt	Cumulatif
TRI avant impôt - actifs	%	16,0%	#	XOF	XOF	XOF
TRI après impôt - capitaux propres	%	272,3%	0	0	0	0
TRI après impôt - actifs	%	16,0%	1	-27 943	-27 943	-27 943
Retour simple	an	2,4	2	-38 730	-38 730	-66 673
Retour sur les capitaux propres	an	immédiat	3	-49 636	-49 636	-116 309
Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF	4 968 812	4	1 586 611	1 586 611	1 470 302
Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an	879 401	5	1 575 463	1 575 463	3 045 765
Ratio avantages-coûts	#DIV/0!		6	1 564 193	1 564 193	4 609 959
Recouvrement de la dette	0,97		7	1 552 799	1 552 799	6 162 758
Coût de réduction de GES	XOF/tCO2	(512 242)	8	1 541 280	1 541 280	7 704 038
			9	1 529 634	1 529 634	9 233 673
			10	1 517 860	1 517 860	10 751 533

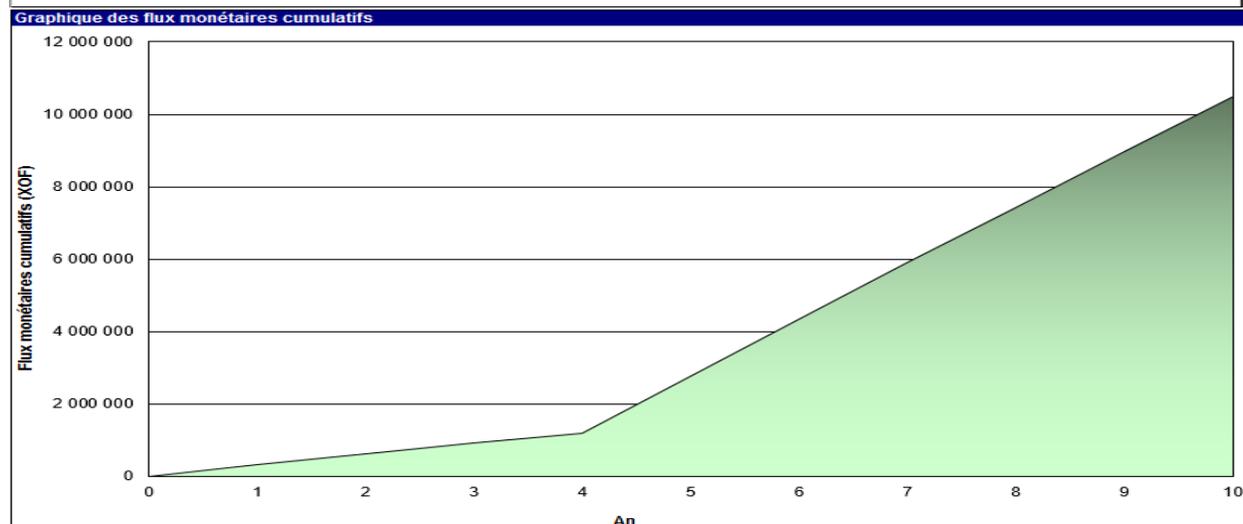
Annexe VI.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	3 956 471
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	3 956 471
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	970 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Paievements de la dette - 3 ans		XOF	1 647 273
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	2 617 273
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	2 600 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	2 600 000

Annexe VII : Dette étalée sur 4 ans pour un hectare

Annexe VII.1

Paramètres financiers			
Général			
Taux d'indexation des combustibles	%		0,0%
Taux d'inflation	%		1,1%
Taux d'actualisation	%		12,0%
Durée de vie du projet	an		10
Financement			
Encouragements et subventions	XOF		0
Ratio d'endettement	%		100,0%
Dette du projet	XOF		3 956 471
Capitaux propres investis	XOF		0
Taux d'intérêt sur la dette	%		12,00%
Durée de l'emprunt	an		4
Paievements de la dette	XOF/an		1 302 606



Annexe VII.2

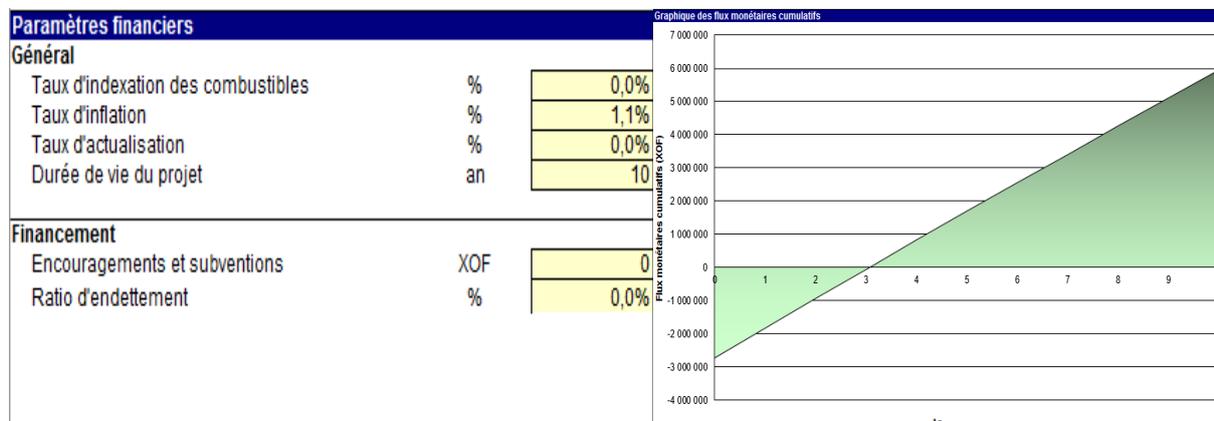
Viabilité financière			Flux monétaires annuels			
TRI avant impôt - capitaux propres	%	positif	An	Av. impôt	Apr. impôt	Cumulatif
TRI avant impôt - actifs	%	16,2%	#	XOF	XOF	XOF
TRI après impôt - capitaux propres	%	positif	0	0	0	0
TRI après impôt - actifs	%	16,2%	1	316 724	316 724	316 724
Retour simple	an	2,4	2	305 936	305 936	622 660
Retour sur les capitaux propres	an	immédiat	3	295 030	295 030	917 690
Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF	4 968 812	4	284 004	284 004	1 201 694
Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an	879 401	5	1 575 463	1 575 463	2 777 157
Ratio avantages-coûts		#DIV/0!	6	1 564 193	1 564 193	4 341 351
Recouvrement de la dette		1,22	7	1 552 799	1 552 799	5 894 150
Coût de réduction de GES	XOF/tCO2	(512 242)	8	1 541 280	1 541 280	7 435 430
			9	1 529 634	1 529 634	8 965 065
			10	1 517 860	1 517 860	10 482 925

Annexe VII.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	3 956 471
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	3 956 471
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	970 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Paielements de la dette - 4 ans		XOF	1 302 606
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	2 272 606
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	2 600 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	2 600 000

Annexe VIII : Rentabilité du projet pour 0,5 ha sans la dette

Annexe VIII.1



Annexe VIII.2

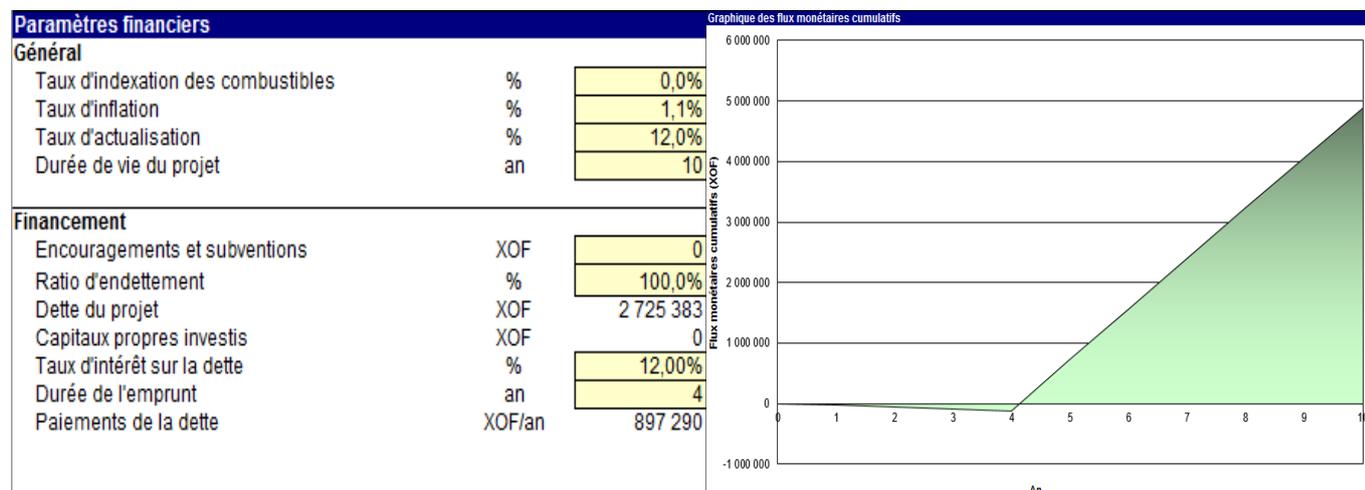
Flux monétaires annuels				Viabilité financière	
An #	Av. impôt XOF	Apr. impôt XOF	Cumulatif XOF		
0	-2 725 383	-2 725 383	-2 725 383	TRI avant impôt - capitaux propres	% 29,1%
1	874 280	874 280	-1 851 103	TRI avant impôt - actifs	% 29,1%
2	868 497	868 497	-982 606	TRI après impôt - capitaux propres	% 29,1%
3	862 651	862 651	-119 955	TRI après impôt - actifs	% 29,1%
4	856 740	856 740	736 784	Retour simple	an 3,1
5	850 764	850 764	1 587 548	Retour sur les capitaux propres	an 3,1
6	844 722	844 722	2 432 270	Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF 5 749 403
7	838 614	838 614	3 270 884	Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an 574 940
8	832 439	832 439	4 103 323	Ratio avantages-coûts	3,11
9	826 196	826 196	4 929 519		
10	819 884	819 884	5 749 403		

Annexe VIII.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	2 725 383
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	2 725 383
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	520 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	520 000
Coûts périodiques (crédits)			
<hr/>			
Economies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	1 400 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	1 400 000

Annexe IX : Rentabilité du projet pour 0,5 ha avec 95% de dette étalée sur 4 ans

Annexe IX.1



Annexe IX.2

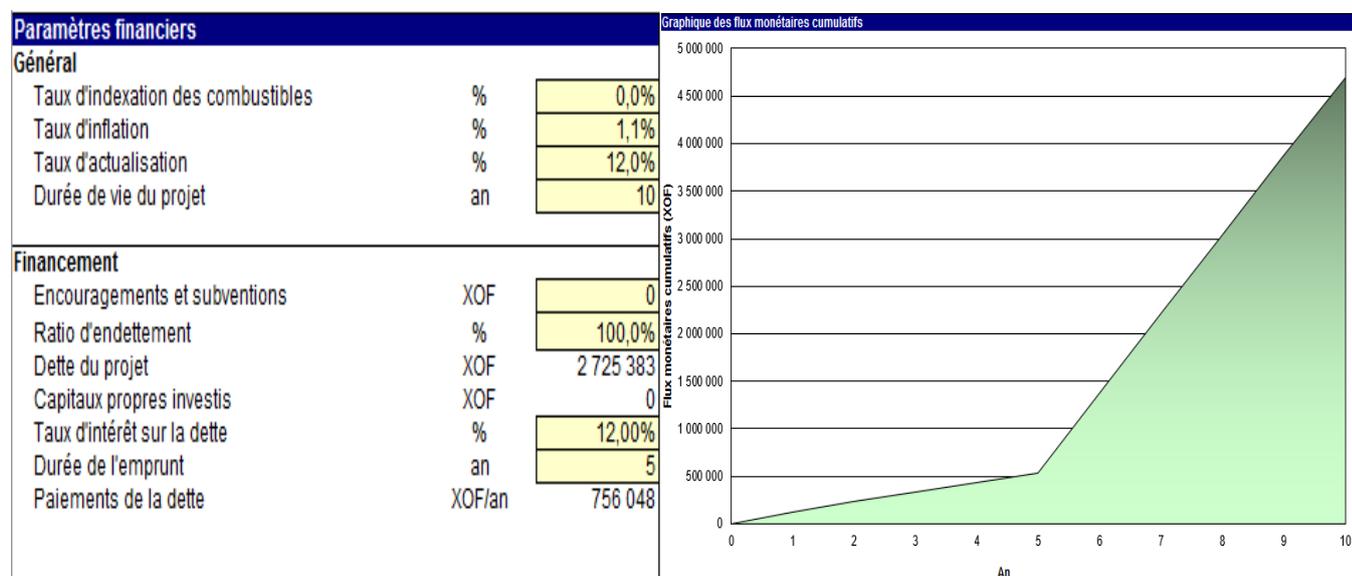
Flux monétaires annuels				Viabilité financière	
An #	Av. impôt XOF	Apr. impôt XOF	Cumulatif XOF		
0	0	0	0	TRI avant impôt - capitaux propres	% 139,4%
1	-23 010	-23 010	-23 010	TRI avant impôt - actifs	% 8,1%
2	-28 793	-28 793	-51 803	TRI après impôt - capitaux propres	% 139,4%
3	-34 639	-34 639	-86 442	TRI après impôt - actifs	% 8,1%
4	-40 550	-40 550	-126 993	Retour simple	an 3,1
5	850 764	850 764	723 771	Retour sur les capitaux propres	an immédiat
6	844 722	844 722	1 568 494	Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF 2 094 254
7	838 614	838 614	2 407 108	Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an 370 650
8	832 439	832 439	3 239 547	Ratio avantages-coûts	#DIV/0!
9	826 196	826 196	4 065 742	Recouvrement de la dette	0,95
10	819 884	819 884	4 885 626		

Annexe IX.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	2 725 383
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	2 725 383
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	520 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Paielements de la dette - 4 ans		XOF	897 290
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	1 417 290
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	1 400 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	1 400 000

Annexe X : Rentabilité du projet pour 0,5 ha avec 95% de dette étalée sur 5 ans

Annexe X.1



Annexe X.2

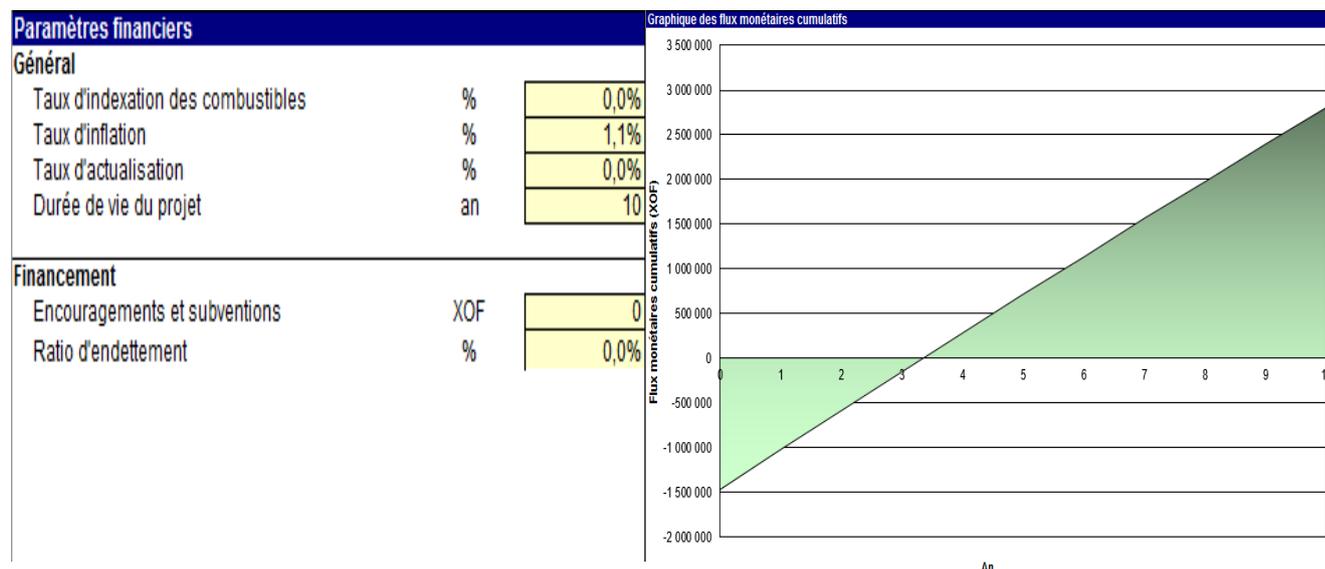
Flux monétaires annuels				Viabilité financière	
An #	Av. impôt XOF	Apr. impôt XOF	Cumulatif XOF		
0	0	0	0	TRI avant impôt - capitaux propres	% positif
1	118 232	118 232	118 232	TRI avant impôt - actifs	% 7,8%
2	112 449	112 449	230 681	TRI après impôt - capitaux propres	% positif
3	106 603	106 603	337 284	TRI après impôt - actifs	% 7,8%
4	100 692	100 692	437 976	Retour simple	an 3,1
5	94 716	94 716	532 692	Retour sur les capitaux propres	an immédiat
6	844 722	844 722	1 377 414	Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF 2 094 254
7	838 614	838 614	2 216 029	Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an 370 650
8	832 439	832 439	3 048 467		
9	826 196	826 196	3 874 663		
10	819 884	819 884	4 694 547	Ratio avantages-coûts	#DIV/0!
				Recouvrement de la dette	1,13

Annexe X.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	2 725 383
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	2 725 383
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	520 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Paiements de la dette - 5 ans		XOF	756 048
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	1 276 048
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	1 400 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	1 400 000

Annexe XI : Rentabilité du projet pour 0,25 ha sans la dette

Annexe XI.1



Annexe XI.2

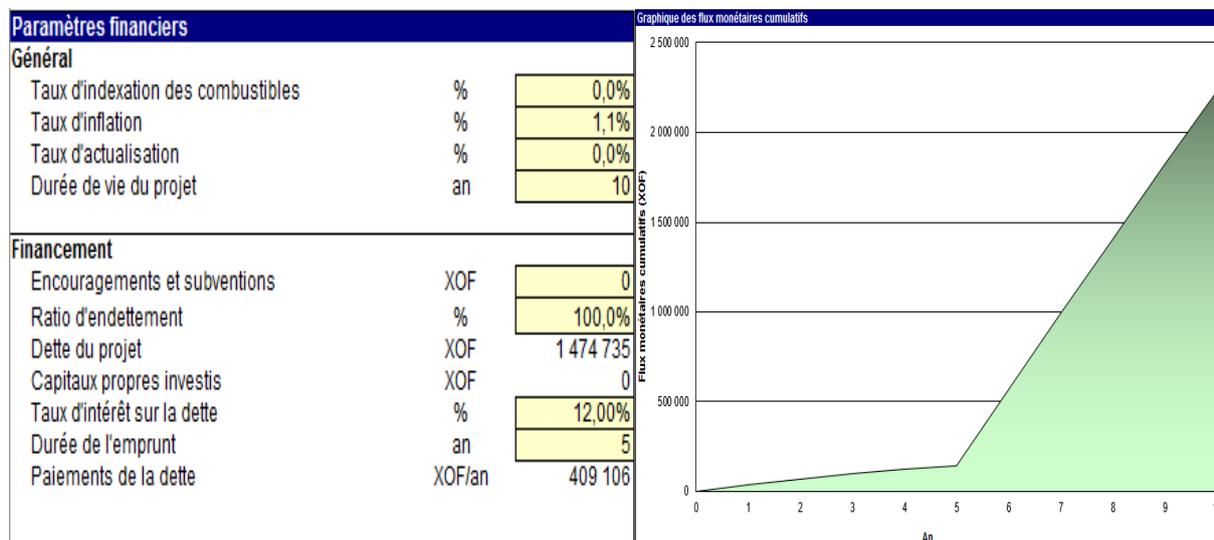
Flux monétaires annuels				Viabilité financière	
An #	Av. impôt XOF	Apr. impôt XOF	Cumulatif XOF		
0	-1 474 735	-1 474 735	-1 474 735	TRI avant impôt - capitaux propres	% 26,8%
1	446 150	446 150	-1 028 585	TRI avant impôt - actifs	% 26,8%
2	442 258	442 258	-586 328	TRI après impôt - capitaux propres	% 26,8%
3	438 322	438 322	-148 005	TRI après impôt - actifs	% 26,8%
4	434 344	434 344	286 339	Retour simple	an 3,3
5	430 322	430 322	716 661	Retour sur les capitaux propres	an 3,3
6	426 255	426 255	1 142 916	Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF 2 806 371
7	422 144	422 144	1 565 060	Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an 280 637
8	417 988	417 988	1 983 048		
9	413 786	413 786	2 396 833	Ratio avantages-coûts	2,90
10	409 537	409 537	2 806 371		

Annexe XI.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	1 474 735
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	1 474 735
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	350 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	350 000
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	800 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	800 000

Annexe XII : Rentabilité du projet pour 0,25 ha avec 95% de dette étalée sur 5 ans

Annexe XII.1



Annexe XII.2

Flux monétaires annuels				Viabilité financière	
An #	Av. impôt XOF	Apr. impôt XOF	Cumulatif XOF		
0	0	0	0	TRI avant impôt - capitaux propres	% positif
1	37 044	37 044	37 044	TRI avant impôt - actifs	% 5,7%
2	33 152	33 152	70 196	TRI après impôt - capitaux propres	% positif
3	29 217	29 217	99 412	TRI après impôt - actifs	% 5,7%
4	25 238	25 238	124 650	Retour simple	an 3,3
5	21 216	21 216	145 866	Retour sur les capitaux propres	an immédiat
6	426 255	426 255	572 122	Valeur Actualisée Nette (VAN)	XOF 2 235 576
7	422 144	422 144	994 266	Économies annuelles sur la durée de vie	XOF/an 223 558
8	417 988	417 988	1 412 253	Ratio avantages-coûts	#DIV/0!
9	413 786	413 786	1 826 039	Recouvrement de la dette	1,05
10	409 537	409 537	2 235 576		

Annexe XII.3

Sommaire des coûts, économies et revenus du projet			
Coûts d'investissement			
Système de production	100,0%	XOF	1 474 735
Infrastructures connexes et divers	0,0%	XOF	0
Total des coûts d'investissement	100,0%	XOF	1 474 735
Frais annuels et paiements de la dette			
Exploitation et entretien		XOF	350 000
Coût en combustible - cas proposé		XOF	0
Paielements de la dette - 5 ans		XOF	409 106
Total des frais annuels et paiements de la dette		XOF	759 106
Coûts périodiques (crédits)			
Économies et revenus annuels			
Coût en combustible - cas de référence		XOF	800 000
Total des économies et des revenus annuels		XOF	800 000